LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 14
ottobre 1969
anno II
volume III

Il frumento ibrido

Molti problemi legati all'ibridazione di questo importante cereale sono ora risolti. L'introduzione definitiva di frumento ibrido su larga scala avrà un influsso importante sull'economia e sull'alimentazione

di Byrd C. Curtis e David R. Johnston

In questo secolo la produzione di due importanti cereali, granoturco e sorgo, è stata rivoluzionata dalla tecnica dell'ibridazione massale, ossia dall'incrocio di due differenti linee o varietà inincrociate per ottenere una discendenza con qualità piú desiderabili di quelle possedute dalle due linee parentali. Pare che ora un altro importante cereale, il frumento, sia sull'orlo di una simile rivoluzione. I problemi legati alla produzione di frumento ibrido su scala commercialmente realizzabile sono stati particolarmente difficili, ma negli ultimi anni si è avuto un progresso soddisfacente; si può quindi profetizzare con una certa sicurezza che la definitiva introduzione e diffusione di varietà di frumento ibrido avrà un influsso economico e alimentare molto maggiore di quello dell'introduzione di qualsiasi altro cereale ibrido ora coltivato.

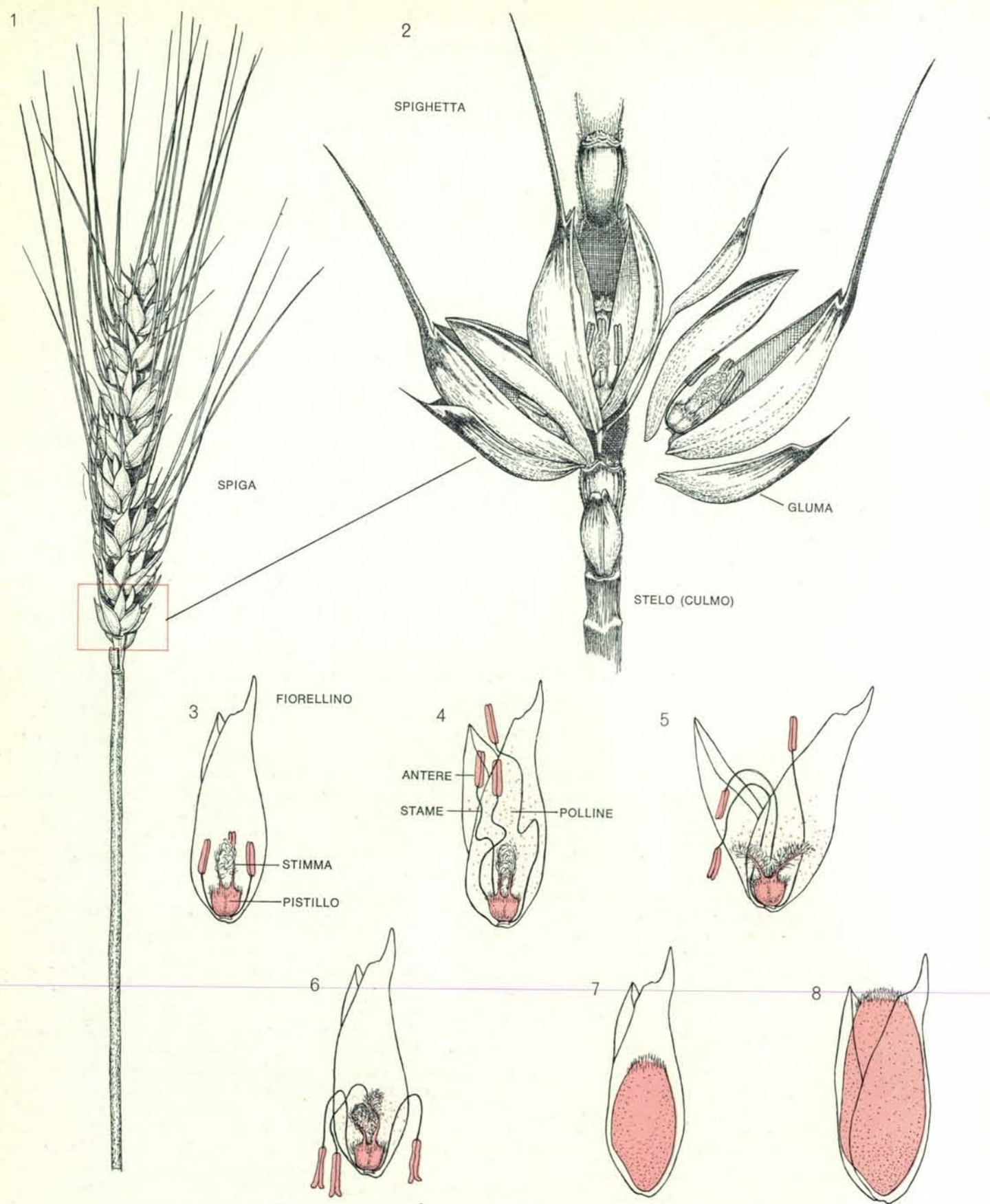
La base di tutti questi tentativi di manipolazione genetica è il fenomeno del vigore degli ibridi, ossia la tendenza della prole di varietà incrociate ad avere maggior vitalità di quella dei discendenti di varietà inincrociate. Il vigore degli ibridi si può manifestare in molti modi: aumento del raccolto, resistenza maggiore alle malattie, agli insetti o al clima difficile, periodo di crescita abbreviato e qualità migliori per la macinazione o per la cottura. Nel caso del frumento il principale miglioramento che si cerca di ottenere è l'aumento del raccolto.

Accade che il maggior vigore degli ibridi si manifesti al massimo grado nella prima generazione dopo l'incrocio; le generazioni successive mostrano una drastica riduzione del vigore. Perciò lo scopo di qualunque programma di ibridazione è di perfezionare una tecnica per produrre sufficienti semi ibridi per poter coltivare piante di prima generazione su vasta scala.

Poiché in generale tutto il granoturco è ibrido, con questo cereale il programma fu di facile realizzazione. Il granoturco è una specie allogama, in cui gli organi sessuali maschili (nel pennacchio o apice) e quelli femminili (nella spiga o pannocchia) sono posti in parti completamente separate della stessa pianta. Asportando manualmente l'apice che ha gli organi maschili, la pianta « diventa » solo femminile e perciò incapace di autofecondazione; i semi prodotti sulla pannocchia saranno ibridi, in quanto con ogni probabilità saranno fecondati dal polline di altre piante. Con questo metodo furono prodotti tanti semi ibridi da poter seminare l'intero territorio coltivato a granoturco degli Stati Uniti, non oltre 20 anni da che le prime varietà ibride erano state introdotte, cioè negli anni trenta.

Negli anni immediatamente successivi al 1950 fu sviluppata una nuova tecnica per produrre semi di granoturco ibrido. Essa consisteva in un procedimento genetico raffinato per indurre la sterilità maschile in una generazione di piante di granoturco; queste piante vengono poi incrociate con una varietà capace di ripristinare la piena fecondità nelle piante della prima generazione dell'incrocio. Questo metodo eliminava la necessità di distaccare a mano le infiorescenze maschili: ora viene correntemente impiegato nella produzione di una grande percentuale del raccolto mondiale di granoturco ibrido.

Per la produzione di sorgo ibrido ha avuto buon esito una tecnica simile; in pochi anni essa si è risolta nell'ibridazione dell'intero raccolto di sorgo degli Stati Uniti. Si tratta essenzialmente di una variazione del metodo generale che è stato applicato per l'ibridazione del frumento.

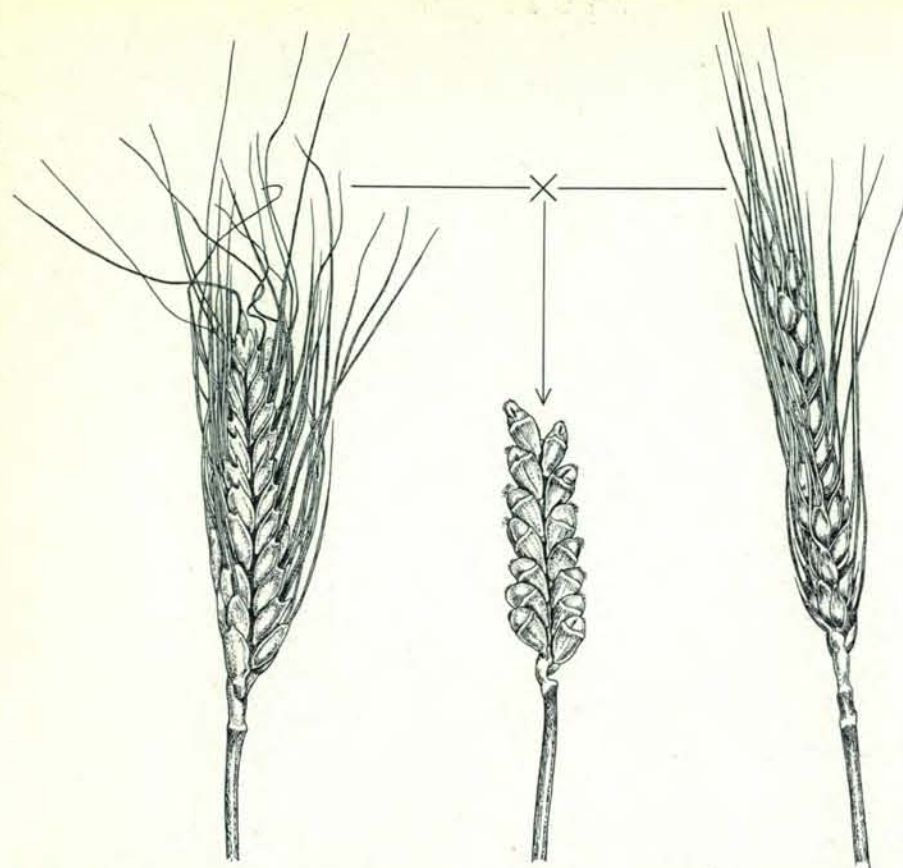
A differenza del granoturco, il frumento si autoimpollina quasi al 100 per cento. Gli organi sessuali maschili e femminili – gli stami maschili contenenti il polline e il pistillo femminile contenente l'ovulo – sono situati nello stesso fiore (*si veda la figura a pagina 12*). Normalmente le antere (le porzioni allungate degli stami, portatrici di polline) forniscono polline allo stimma (la porzione piumosa del pistillo) prima che il fiore si apra tanto da permettere l'entrata di polline di altre piante. Per ottenere un singolo seme ibrido è necessario asportare le tre antere di un fiore con una pinzetta e successivamente applicare a mano il polline di un'altra pianta allo stimma. Per avere una garanzia di successo, si deve scegliere il momento esatto per tutte queste operazioni ed eseguirle con grande cura. È ovvio che non si possono produrre

In questa serie di disegni è rappresentata l'autofecondazione di un singolo fiore di frumento. Il disegno *1* mostra una tipica spiga matura di frumento; il disegno *2* mostra come l'infiorescenza del frumento sia formata da file alternate di spighette, ciascuna delle quali contiene diversi fiorellini (in questo caso tre) rivestiti da bratte e sterili dette glume. I disegni da *3* a *6* mostrano come le antere (le parti allungate degli stami maschili, portatrici di polline) normalmente forniscano polline allo stimma (la parte piumosa del pistillo femminile) prima che il fiore si apra abbastanza per permettere l'entrata di polline proveniente da altre piante. I disegni *7* e *8* mostrano come l'ovulo fecondato si trasformi nel seme, o cariosside, di frumento. La trebbiatura separa le cariossidi completamente sviluppate dal resto della pianta, ossia dalla paglia o pula.

in questo modo quantità commerciali di semi ibridi.

A questo punto si dovrebbe notare che molte varietà di frumento ora coltivate sono chiamate impropriamente frumento ibrido. Questo errore deriva dal fatto che è possibile trarre varietà migliorate da un ibrido ottenuto manualmente a distanza di parecchie generazioni. I migliori discendenti dell'ibrido originale vengono selezionati e incrociati mediante autoimpollinazione per cinque o sei generazioni successive, finchè si ottiene una pianta di « linea pura » o che si mantiene fedele al tipo. Tale pianta, combinando le buone caratteristiche dei progenitori, produrrà piante simili in tutte le generazioni successive, purché sia autoimpollinata e non avvenga una mutazione. La maggior parte delle varietà moderne di frumento sono state ottenute con alcuni di questi procedimenti, ma evidentemente non sono veri ibridi.

Lo sviluppo di una tecnica per produrre semi di frumento veramente ibridi su vasta scala cominciò negli anni appena successivi al 1950, pressappoco nello stesso periodo in cui si perfezionava la tecnica di indurre la sterilità maschile per ottenere granoturco ibrido. Il ricercatore giapponese H. Kihara riferí nel 1951 di essere riuscito ad indurre « sterilità citoplasmica maschile » nel frumento; questo tipo di sterilità maschile talvolta risulta quando il nucleo di una cellula interferisce col citoplasma di una cellula di diversa specie. Kihara aveva trasferito il nucleo di un comune frumento per panificazione, o grano tenero, (*Triticum aestivum* sottospecie *vulgare*) nel citoplasma di un parente selvatico del frumento, chiamato grano delle formiche (*Aegilops caudata*) e aveva trovato che la discendenza era feconda per gli organi femminili, ma sterile per quelli maschili. Nel 1953 il giapponese H. Fukasawa ottenne risultati simili con una differente specie selvatica, la gramigna stellata (*Aegilops ovata*), usandola come genitrice femminile in un incrocio con grano duro (*Triticum durum*), una specie usata principalmente per confezionare la pasta. Piú tardi Kihara sviluppò ancora un'altra varietà a stami sterili incrociando due specie di frumento note come *Triticum dicoccum* e *Triticum timopheevi*.

Nessuna di queste ricerche riuscí a fornire una tecnica di sterilizzazione maschile per il frumento ibrido, utile dal punto di vista commerciale, a causa degli avversi effetti collaterali prodotti dalle particolari linee che erano sta-

L'evirazione di un fiore di frumento viene compiuta togliendo le tre antere del fiore con una pinzetta. In seguito si può applicare manualmente sullo stimma il polline di un'altra pianta, allo scopo di ottenere un seme singolo di frumento ibrido. Questo procedimento è sperimentale e non è ovviamente realizzabile dal punto di vista commerciale, come metodo per produrre grandi quantità di semi di frumento ibrido.

Sulla spiga di frumento al centro sono stati ottenuti semi portatori di sterilità maschile fecondando i fiori di una pianta evirata chiamata *Triticum timopheevi* con polline di una varietà di grano tenero, il *Triticum aestivum*. Le spighe normali dei genitori, femmina e maschio, appaiono rispettivamente a sinistra e destra. La « sterilità citoplasmica maschile » della varietà incrociata deriva da una interazione dei geni cromosomiali dei nuclei delle cellule paterne con uno sconosciuto fattore ereditario del citoplasma delle cellule materne. Reincroci di piante completamente feconde della varietà comune di grano tenero con piante della discendenza sterile dal lato maschile danno per risultato una linea stabile a sterilità citoplasmica maschile.

te incrociate. Tuttavia i reperti stimolarono esperimenti ulteriori e piú riusciti. Nel 1961 J.A. Wilson e W.M. Ross, lavorando alla Kansas Agricultural Experiment Station, ottennero frumenti per panificazione stabili, a sterilità citoplasmica maschile, incrociando *T. timopheevi* come femmina o pianta da seme con una varietà di *T. aestivum* chiamata frumento Bison. Reincrociando ripetutamente la varietà Bison con tali ibridi, si ottennero alla fine linee Bison a sterilità citoplasmica maschile. Queste linee furono distribuite largamente sul mercato internazionale e sono l'origine di molte varietà correnti di frumento a sterilità maschile.

Affinché il sistema di sterilità citoplasmica maschile possa essere utilizzato per la produzione di frumento ibrido, è necessario trovare una tecnica corrispondente per ristabilire la fecondità. Una linea Bison a stami sterili, impollinata dal normale frumento fecondo Bison o da altre varietà normali, non ripristinatrici di fecondità, produrrà una discendenza pure sterile negli organi maschili. Questo risultato è naturalmente un importante e integrale passo avanti per il mantenimento e l'incremento dei semi della varietà a sterilità maschile; ma è necessario che i semi usati dal contadino per coltivare il suo ibrido abbiano la possibilità di conferire fecondità maschile nelle piante. Ciò si ottiene impollinando le piante sterili negli organi maschili con una varietà che ripristina la fecondità. Tali varietà hanno in sé geni dominanti ripristinatori capaci di vincere la reazione citoplasma-nucleo che provoca la sterilità maschile. Si è dimostrato assai difficile trovare sistemi per ristabilire la fecondità con gene dominante ad alta efficacia; ma sono stati riferiti alcuni sistemi che ristabiliscono la fecondità rispettando determinate condizioni ambientali.

Nel 1960 Wilson e Ross annunciarono la scoperta di fattori che ripristinavano parzialmente la fecondità nel grano tenero per uno dei citoplasmi su cui Fukasawa aveva lavorato. Poi, nel febbraio del 1962, Wilson fece notare che geni ripristinatori dovevano esistere in *T. Timopheevi*, dato che esso porta il citoplasma sterile; altrimenti tale frumento avrebbe organi maschili e sarebbe incapace di riprodursi. Parecchi mesi piú tardi John W. Schmide, V.A. Johnson e S.D. Mann della Nebraska Agricultural Experiment Station dimostrarono che un frumento per panificazione derivato da *T. timopheevi* era efficace nel ristabilire la fecondità nel frumento Bison con organi maschili sterili. Poco dopo Wilson, lavorando indipendentemente, giunse alle stesse conclusioni. In successivi studi questi stessi ricercatori e altri hanno mostrato che le cause originarie dell'azione ripristinante non erano completamente efficaci nel ristabilire la fecondità delle piante Bison e in altri frumenti sterili in tutte le condizioni ambientali.

Negli anni successivi alla scoperta di questi fattori ripristinanti, è apparso sempre piú sicuro che i geni preposti a ciò e i modificatori di questi geni sono distribuiti tra parecchie varietà di frumento esistenti. Per esempio, Ronald W. Livers della Kansas Agricultural Experiment Station ha compilato una lista di varietà comuni che portano i geni per un parziale ripristino. Un importante gene ripristinatore fu pure trovato in una varietà chiamata frumento Primepi da E. Oehler e M. Ingold in Francia. Sono in corso molte ricerche per raggruppare abbastanza geni ripristinanti in singole varietà desiderabili dal punto di vista agrario, allo scopo di ottenere ibridi completamente fecondi, dopo averle incrociate con varietà sterili per gli organi maschili, ma valide dal punto di vista agrario. Una società privata produttrice di sementi ha annunciato il successo di questo sforzo e ha distribuito tra gli agricoltori parecchie varietà di semi di frumento ibrido per coltivazioni di prova.

La reazione citoplasma-nucleo che conduce alla sterilità maschile è un processo non ben chiarito. Nelle piante fertili c'è evidentemente un buon equilibrio tra i geni cromosomali e un meccanismo ereditario sconosciuto portato nel citoplasma. Nelle piante portatrici di sterilità maschile citoplasmica questo delicato equilibrio è indubbiamente in qualche modo sconvolto, tanto da produrre antere deformate e granuli pollinici vuoti o sterili (*si veda la figura a pagina 16*). In contrasto con le antere normali, le antere di piante sterili sono piú esili e tendono ad arricciarsi alla base, in modo da assumere la forma di una punta di freccia. Tali antere producono poco polline, e quel poco non può compiere la fecondazione. Lo squilibrio indotto non ha evidentemente effetto sul pistilli: se si applica sullo stimma polline normale, questo funzionerà in modo adatto, e si produrrà un seme. Infatti vi sono ben pochi segni che indichino una differenza morfologica tra piante sterili per gli organi sessuali maschili e piante normali, se si eccettuano le antere difettose e il polline.

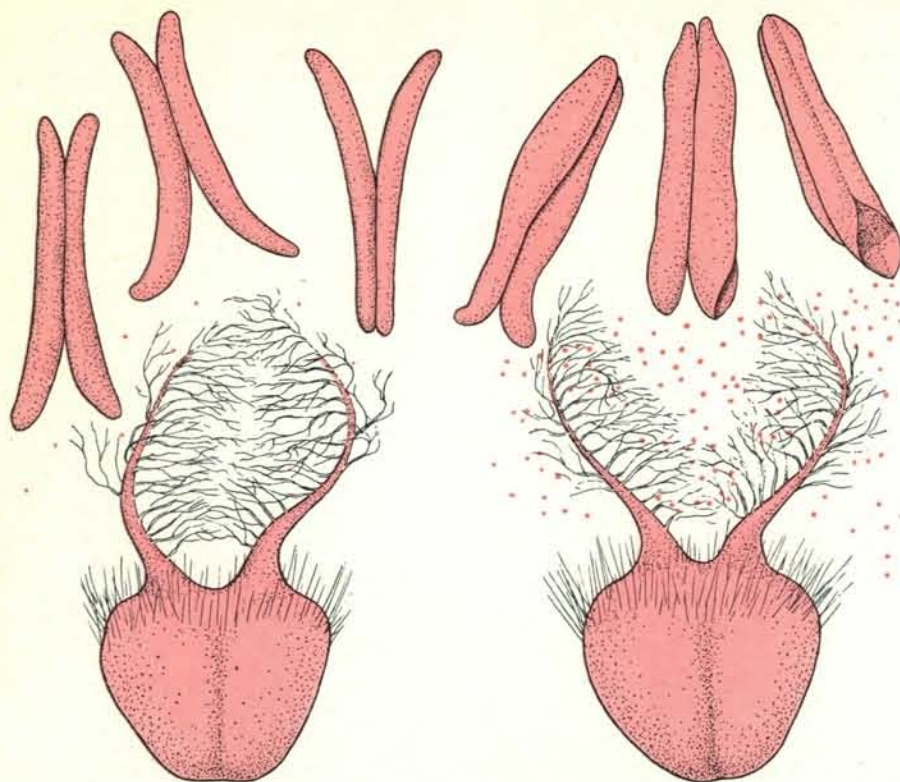
Si possono sviluppare linee portatrici di sterilità citoplasmica maschile, cominciando con una linea stabile tipo frumento Bison o frumento Wichita, col metodo del reincrocio (*si veda la figura a pagina 17 in alto*). La generazione finale sarà identica al genitore ricorrente nella maggior parte delle caratteristiche, salvo che sarà sterile per gli organi maschili anziché completamente feconda. Allo scopo di prevenire la contaminazione da parte di polline estraneo e di garantire che solo il polline del genitore ricorrente compia la fecondazione, occorre trovare qualche stratagemma per isolare la singola pianta, per esempio quello di porre un sacchetto di plastica sopra la cima.

Alcune varietà di frumento si sono dimostrate difficili da sterilizzare. Tra queste piante, che di solito possiedono un gene ripristinatore che previene la sterilizzazione, sono comprese parecchie importanti varietà commerciali. Non si è ancora scoperto il motivo perché queste varietà posseggano tali geni. Forse questi geni sono sorti per mutazione oppure si sono tramandati per mezzo di incroci naturali in *T. timopheevi* nelle generazioni passate.

Le varietà sterili per gli organi maschili vengono mantenute e accresciute coltivando le piante a stami sterili, o linea *A*, in strisce regolari sul terreno agricolo. Queste sono situate tra strisce di piante normali feconde, o linea *B*. Le piante semisterili sono impollinate dal polline delle piante feconde sospinto dal vento. I semi delle piante semisterili vengono raccolti (per mezzo della mietitrebbiatrice) separatamente dai semi delle piante feconde; dopo che si è ottenuto un aumento sufficiente, il seme della pianta portatrice di sterilità maschile è pronto a essere piantato come femmina accanto a una linea ripristinatrice, cosí come il maschio serve alla produzione di semi ibridi.

È molto piú difficile e laborioso sviluppare piante con ulteriori ristoratori, o linea *R*, di una data origine che sviluppare linee addizionali sterili per gli organi maschili. Per esempio, allo scopo di produrre una linea ripristinante della varietà Scout si devono selezionare e reincrociare le piante ripristinatrici dominanti in successive generazioni alla linea del genitore Scout. Dopo parecchie ripetizioni del ciclo, le caratteristiche delle piante Scout sono combinate coi geni ripristinatori dominanti, dando luogo ad una varietà Scout ripristinatrice (*si veda la figura a pagina 17 in basso*).

Si può usare lo stesso procedimento generale per produrre una nuova varietà ripristinatrice con le caratteristiche desiderabili della linea Scout combinate con le caratteristiche desiderabili della pianta originaria ripristinatrice. Qui, come già detto, le piante ripristinatrici di seconda generazione verrebbero selezionate per produrre la terza genera-

Confronto tra spighe mature di frumento Bison, di aspetto completamente diverso. A sinistra una spiga a sterilità citoplasmica maschile, aperta e pronta per l'impollinazione incrociata. Al centro una spiga completamente feconda che si autoimpollina. A destra una spiga parzialmente feconda derivata da una linea a sterilità citoplasmica maschile; la sua fecondità è stata parzialmente ripristinata incrociando il suo genitore a stami sterili come femmina con una varietà di grano tenero derivata da *T. timopheevi* come maschio. La scoperta dei fattori ripristinanti la fecondità del grano tenero all'inizio degli anni sessanta stimolò una maggiore espansione nello sforzo di ricerca rivolto allo sviluppo di nuove varietà di frumento ibrido.

Organi sessuali di una pianta a sterilità maschile di frumento Bison (*a sinistra*) confrontati con quelli di una pianta normale di frumento Wichita (*a destra*). Le antere della pianta a sterilità maschile (*a sinistra in alto*) sono piú esili delle antere normali (*a destra in alto*) e tendono ad arricciarsi alla base, assumendo una forma appuntita. Il poco polline prodotto dalle antere della pianta (*a sinistra*) è sterile e non può compiere la fecondazione. Il pistillo della pianta a sterilità maschile (*a sinistra in basso*) è morfologicamente identico a quello della pianta normale (*a destra in basso*).

zione e le successive. Tuttavia, per la continuazione, verrebbero selezionate in ciascuna generazione le piante migliori dal punto di vista agrario. Cosí, dopo la quinta generazione, diventerebbe possibile selezionare piante che si avvicinano alla condizione di linea pura.

Un requisito importante per qualsiasi schema di coltivazione avente lo scopo di produrre linee ripristinatrici è che le piante prescelte di ogni generazione siano incrociate con una varietà a sterilità citoplasmica maschile per poter determinare se le piante prescelte siano realmente portatrici dei geni ripristinatori. Nelle piante di prima generazione dopo questi incroci di prova verrà ristabilita completamente la fecondità maschile, se le piante prescelte portano i geni che ristabiliscono tale fecondità.

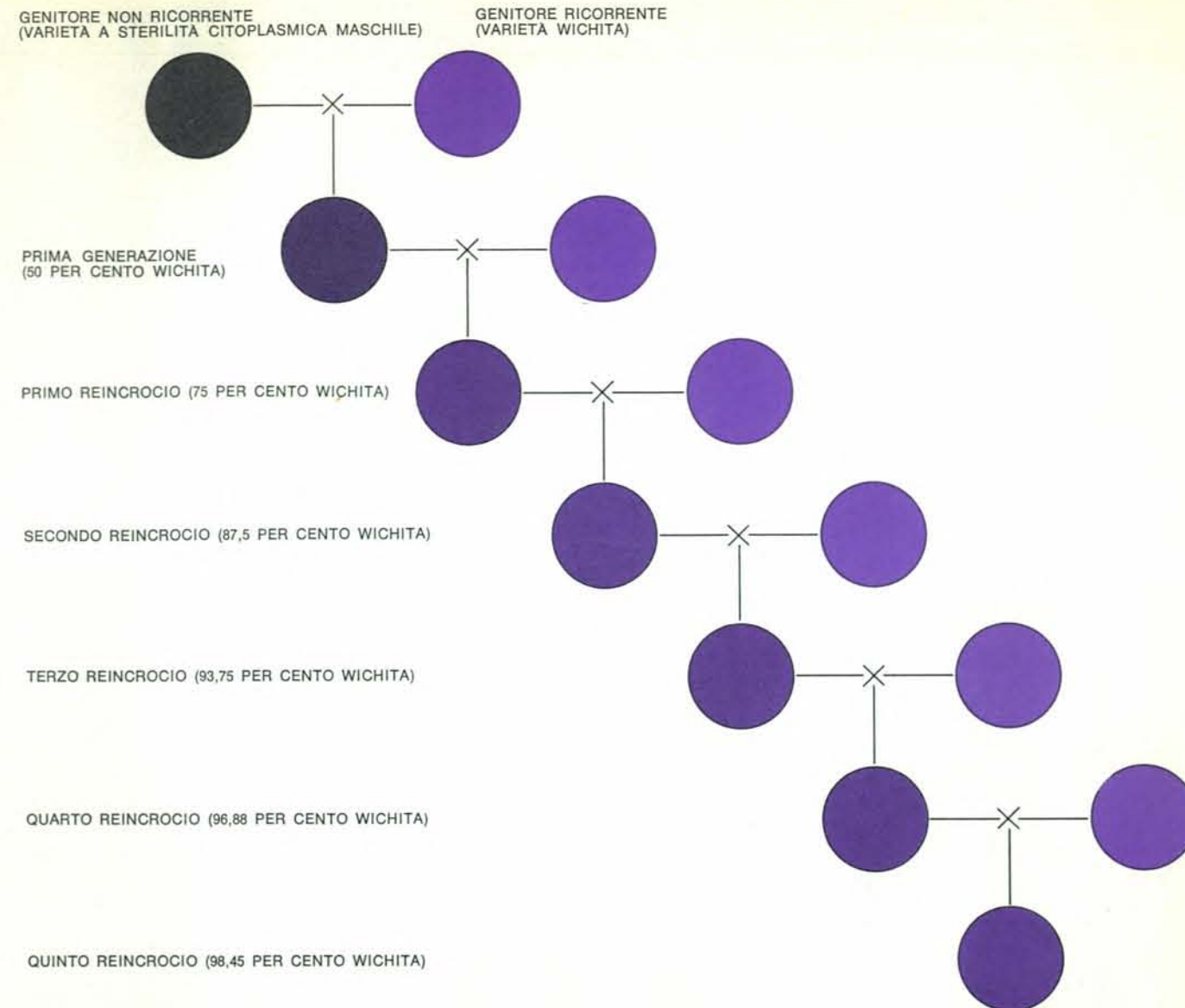
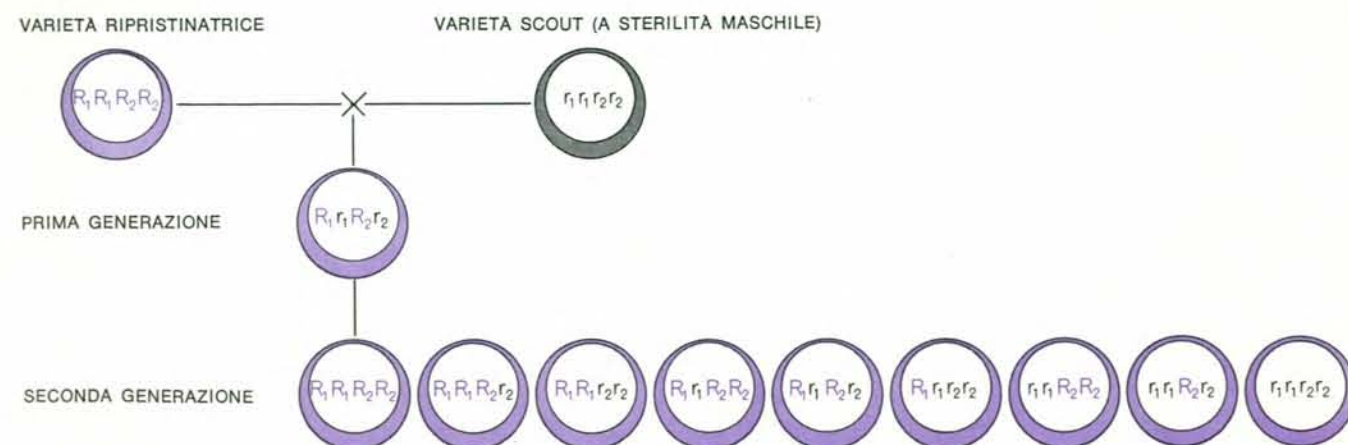
Dopo che è stato prodotto un certo numero di linee a stami sterili e ripristinatrici, varie combinazioni di ibridi vengono eseguite ed esaminate in un terreno agrario, per determinare quali ibridi manifestino maggior vigore per una data superficie di produzione. Una volta che ciò è stato stabilito, si possono produrre per la vendita agli agricoltori semi ibridi su vasta scala. Tali semi produrranno piante ibride di prima generazione che si spera possiedano il livello di vigore desiderato. Ovviamente è necessario che il vigore degli ibridi si manifesti, altrimenti l'agricoltore non guadagna nulla dalla loro coltivazione.

Il livello di vigore che può essere raggiunto per il frumento ibrido in coltivazioni su vasta scala su terreno agrario non è stato ancora stabilito, a causa della non disponibilità di sufficienti riserve di semi per tali coltivazioni. Nella letteratura sul frumento si possono trovare molte relazioni sull'aumento di vigore degli ibridi in piccole coltivazioni sperimentali eseguite in varie parti del mondo. Si può ricavare da queste relazioni che non sarebbe difficile ottenere un aumento di resa del 20-30 per cento da coltivazioni su vasta scala in terreno agrario. I dati su tali coltivazioni dovrebbero essere pronti tra 2-4 anni; sarà allora possibile accertare il grado di vigore degli ibridi che si può realizzare nel frumento.

Finora abbiamo discusso solo il meccanismo con cui si possono produrre sperimentalmente piante di frumento ibrido. Non si è fatto cenno alle difficoltà che si incontrano di solito nello sviluppare le linee a stami sterili o nel coltivare i semi ibridi su terreno agrario.

La maggior difficoltà nel produrre ibridi economicamente validi, oltre a quella di sviluppare adeguate linee ripristinatrici, si è trovata nel mancato ottenimento di una impollinazione incrociata soddisfacente. Questa impollinazione è influenzata da molti fattori, compresa la sincronizzazione dei periodi di fioritura delle piante a stami sterili e di quelle impollinatrici. I capricci del tempo hanno pure un forte peso sull'impollinazione incrociata. Il problema di procurare fiori femminili ricettivi nel periodo di massima dispersione di polline dipende dalla maturità relativa delle due varietà di genitori. Una sincronizzazione adeguata si otterrà seminando simultaneamente la varietà a stami sterili e impollinatrice, con le piante impollinatrici che raggiungono lo stadio di « maturazione » da uno a tre giorni piú tardi delle piante a stami sterili.

In condizioni di tempo fresco e con una adatta provvista di umidità, gli organi sessuali femminili rimangono ricettivi per 8-10 giorni. La massima ricettività è raggiunta da tre a cinque giorni dopo che si sono formate completamente le infiorescenze del frumento. Se accade che la varietà impollinante maturi piú presto di quella a stami sterili, la massima dispersione di polline può precedere la massima ricettività del fiore, e in conclusione trovare soluzioni a tali problemi regolando il tempo di semina o variando le quantità di semi. Queste attività tuttavia aggiungono un notevole aggravio ai costi di produzione e perciò fanno aumentare il costo dei semi ibridi. Il prezzo piú alto dei semi riduce il guadagno che l'agricoltore ottiene grazie al vigore degli ibridi.

Il polline di frumento ha vita breve e riceve un influsso negativo dal calore eccessivo e dalla siccità. Richard E. Watkins della Università Statale del Colorado ha trovato in laboratorio che il periodo vitale del polline di varietà tipiche di frumento è di meno di cinque minuti dopo l'antesi (l'apertura delle antere) a una temperatura di 35 °C e con l'umidità relativa del 20 per cento. A 18 °C e con l'umidità relativa dell'80 per cento una certa quantità di polline sopravvive per un'ora, con piú del 60 per cento è ancora vitale 20 minuti dopo l'antesi. Oltre a influenzare la vitalità del polline, le alte temperature e la bassa umidità riducono la quantità del polline nell'aria dal momento che l'appassimento delle parti della pianta impedisce la liberazione di polline.

Per incrementare una linea a sterilità citoplasmica maschile di frumento Wichita si usa il metodo del reincrocio. La discendenza finale sarà identica al genitore ricorrente Wichita ma avrà stami sterili anziché essere completamente feconda. In teoria il contenuto genetico del genitore non ricorrente a sterilità maschile si dimezza in ogni generazione di reincrocio.

La linea ripristinatrice, costituita da frumento della varietà Scout, è sviluppata selezionando e reincrociando le piante dominanti ripristinatrici delle generazioni successive alla linea del genitore Scout. Dopo parecchie ripetizioni del ciclo le caratteristiche delle piante Scout risultano combinate con i geni dominanti ripristinatori, producendo alla fine una varietà ripristinatrice. Lo schema mostra i geni dominanti ripristinatori, localizzati nei nuclei di piante derivate dalle piante ripristinatrici originarie, indicati con R_1 e R_2; i geni non ripristinatori, sono indicati con r_1 e r_2. Il citoplasma della varietà a sterilità maschile è colorato, mentre il citoplasma normale è grigio. La pianta ripristinatrice dominante è indicata con $R_1R_1R_2R_2$.

In generale la migliore impollinazione incrociata è stata ottenuta a temperature fresche (ma non troppo) e con umidità media. Anche l'eccessiva piovosità o la nebbia impediscono la dispersione di polline. In queste condizioni il polline è cosí bagnato e reso pesante che non riesce a essere trasportato dall'aria. Tali condizioni di tempo possono anche provocare « allettamento », ossia curvare fino a terra l'intera pianta di frumento, circostanza che potrebbe ulteriormente impedire l'impollinazione incrociata. Per muovere il polline da una pianta all'altra sono necessarie brezze da moderate a forti, ma trὸppo vento può risolversi nella perdita di polline. Pur essendo piú pesante dell'aria il polline di frumento è facilmente portato in alto dai movimenti dell'aria. Alcuni ricercatori hanno suggerito l'uso di macchine per far vento allo scopo di intensificare l'impollinazione incrociata, ma per ora non si ha notizia di riuscite applicazioni di questa tecnica.

È stata compiuta, su terreno agrario, l'impollinazione incrociata di piú del 90 per cento delle piante a stami sterili, ma di solito si raggiungono percentuali moto piú basse. Si ritiene che occorra almeno il 70 per cento di impollinazione incrociata per mantenere il costo dei semi di frumento ibrido a un livello accettabile. Sono in corso tentativi per migliorare l'impollinazione incrociata incorporando (mediante coltivazione) tipi di antera piú grandi e sporgenti nelle piante impollinatrici e fiori aventi un'apertura piú larga e con stimmi piú grandi nelle linee a stami sterili.

Che significato avrà l'avvento di frumento ibrido per gli agricoltori, i mugnai, i panettieri e i consumatori? Agli agricoltori il frumento ibrido dovrebbe procurare maggiori profitti per ettaro di terreno, derivanti non solo dal vigore degli ibridi ma anche da quelle pratiche di gestione piú intense ed efficienti che sembrano accompagnare la introduzione di un seminativo ibrido. Quando fu introdotto il granoturco ibrido, i vantaggi ottenuti da migliori tecniche di gestione furono pari o addirittura maggiori di quelli ottenuti grazie al vigore degli ibridi. I problemi di produzione legati al frumento ibrido non dovrebbero essere maggiori di quelli che si affrontano con le varietà di frumento di linea pura ad alto rendimento. Naturalmente è necessario che gli ibridi abbiano tutte le caratteristiche agrarie a cui è abituato il coltivatore di frumento.

Un carattere specifico che devono possedere i frumenti ibridi è la buona resistenza all'allettamento, particolarmente nelle aree ad alto rendimento. Un aumento di produzione di semi del 25-50 per cento costituisce un aumento del peso che grava sul culmo del frumento e può provocare un grave allettamento. Il fatto che le piante siano pesantemente incurvate si risolve in forti perdite del raccolto dei semi, di energia umana e di tempo per la macchina mietitrice. Un modo per aumentare la resistenza all'allettamento è quello di produrre ibridi con culmi piú corti e piú rigidi. La maggior parte dei programmi di sviluppo del frumento ibrido stanno cercando il modo di superare questo ostacolo e di raggiungere una maggior resistenza all'allettamento. Le varietà seminane altamente produttive di frumento messicano e le varietà seminane di frumento della zona nord-ovest degli Stati Uniti sono alcune tra le fonti di questi ibridi.

In alcune aree importanti, dove il frumento non può svilupparsi in altezza, non sono necessari ibridi con culmo piú corto: molti altipiani degli Stati Uniti sono aree di questo tipo. Però in talune zone degli altipiani, l'irrigazione è in aumento e in futuro sarà quindi necessario produrre piante piú resistenti all'allettamento.

La resistenza alle malattie è un importante attributo per stabilizzare la produzione di frumento in molte parti del mondo. Il frumento ibrido dovrebbe offrire una maggiore flessibilità delle varietà a linea pura nel controllo delle malattie, particolarmente delle malattie parassitarie come le ruggini. Quando viene approntata una varietà pura resistente ai piú importanti funghi della ruggine, di solito sorgono nuove specie di ruggini che attaccano la nuova varietà. La stessa cosa piú o meno accade probabilmente per gli ibridi, solo che è possibile sostituire facilmente nuovi ibridi resistenti al posto dei vecchi. La ragione è che gli agricoltori debbono procurarsi dal produttore dell'ibrido originale nuovi semi per ogni raccolto. È molto verosimile che gli agricoltori che coltivano varietà pure piantino le sementi per i raccolti successivi utilizzando le sementi del raccolto precedente e che perciò perpetuino le varietà predisposte alla ruggine. I produttori di frumento ibrido hanno il dovere di mantenersi al corrente della situazione delle ruggini e di sviluppare ibridi resistenti per combattere la malattia.

Per adattarsi alle svariate condizioni ecologiche delle aree dove il frumento è coltivato sono richieste numerosissime varietà di frumento. Ciò fa pensare che saranno necessari anche molti ibridi differenti che si adattino a svariate nicchie ecologiche. C'è però una certa speranza che uno dei benefici del vigore degli ibridi sia l'aumento di adattabilità. Alcuni esperimenti hanno indicato che l'apparato radicale di una pianta di frumento può essere migliorato per permettere alla pianta di funzionare meglio in condizioni di siccità. Ibridi con queste caratteristiche contribuiranno a stabilizzare la produzione nelle zone del mondo dove la piovosità è molto variabile da stagione a stagione.

Per i mugnai, i panettieri e i consumatori, la qualità del frumento prodotto con ibridi è di grande importanza. Grosso modo i tre quarti del frumento prodotto nel mondo è destinato al consumo umano. Per questa ragione, si è sviluppata una stretta collaborazione tra coltivatori e chimici nel settore dei cereali per cercare di mantenere o di migliorare la qualità appena vengono sviluppate nuove varietà.

La qualità di una particolare varietà di frumento è espressa dal suo uso definitivo. Alcune farine richiedono un alto contenuto proteico; altre no. Alcune richiedono la capacità di assorbire piú acqua di altre. Il gran numero di prodotti derivati dal frumento ha per conseguenza un numero ugualmente grande di denominazioni di farina. La maggior parte del frumento prodotto nell'America del nord è classificato come frumento per panificazione (o grano tenero). Questi tipi di frumento hanno generalmente un alto contenuto proteico e buone proprietà di assorbimento d'acqua e di ritenzione di gas. I migliori di essi vengono mescolati con frumenti piú scadenti per migliorare la qualità della farina usata per la panificazione.

Le varietà di frumento differiscono nella loro capacità di conferire caratteristiche favorevoli alla loro discendenza. In alcuni studi è stato dimostrato che il contenuto proteico degli ibridi di prima generazione può essere piú elevato di quello del migliore genitore. Questo dato è piuttosto in discordanza con le varietà regolari, in cui l'alto rendimento era stato associato con un basso contenuto proteico. Viceversa alcuni ibridi hanno dato meno proteine (e meno rendimento) del genitore piú scadente. Altri incroci hanno prodotto ibridi il cui contenuto proteico è intermedio tra il contenuto proteico dei genitori. Risultati simili sono stati ottenuti per l'assorbimento dell'acqua e per la ritenzione di gas. Ci sono ancora poche indicazioni circa le caratteristiche qualitative del frumento ibrido, ma le informazioni disponibili indicano che con una selezione appropriata dei genitori si possono ottenere ibridi di qualità desiderata.

Negli ultimi dieci anni le ricerche sulla ibridazione del frumento sono state estese su tutti i fronti. Il via a questo sviluppo è stato dato dalla scoperta del sistema della sterilità maschile e della ricostruzione della fecondità. Fino all'inizio di questo decennio, negli USA la ricerca sul frumento è stata concentrata in istituzioni agricole finanziate principalmente con fondi erariali, sia statali sia federali. Grazie a queste istituzioni si ebbe la scoperta del meccanismo per produrre frumento ibrido. La prospettiva di un ampio e permanente mercato per i semi di frumento ibrido ha spinto parecchie ditte private, molte delle quali già esperte nella coltivazione di altri cereali, a iniziare programmi di ricerca volti allo sviluppo di varietà di frumento ibrido. Gli sforzi uniti dei ricercatori pubblici e privati hanno già prodotto risultati notevoli, ma ovviamente è necessaria una ricerca continua in molti settori. Il valore del frumento ibrido può essere mantenuto e potenziato solo con ulteriori sviluppi di migliori linee parentali. È questo il fondamento per la riuscita dei programmi di ibridazione. Lo sviluppo di linee parentali ad alto rendimento, con stelo robusto, resistente alle malattie che producano un seme con buone caratteristiche di macinazione e di cottura assicurerà in futuro il successo del frumento ibrido.

Sul terreno agricolo i semi di frumento ibrido vengono prodotti coltivando alternativamente strisce della linea a stami sterili e della linea che ripristina la fecondità. L'impollinazione delle piante viene compiuta dal polline sospinto dal vento.

Fino alla metà del secolo in corso il problema di fondo dell'agricoltura italiana è stato quello di produrre il frumento con cui sfamare un carico demografico esuberante che faceva del pane il nutrimento fondamentale. Il consumo annuo pro capite si calcolava in 250 kg per i contadini e in 200 kg per le altre categorie; la coltivazione interessava 4,5-5 milioni di ettari che si spingevano anche nelle zone impervie e scarsamente produttive, con una resa media oscillante intorno ai 10 quintali per ettaro. L'affinamento dei metodi colturali, ma soprattutto la ricerca genetica, hanno provocato l'attuale raddoppio di resa per ettaro, riportando alla ribalta l'opportunità di abbandonare la coltivazione nelle terre meno produttive nonché il nuovo problema della qualità, cioè il grano tenero per il pane e il grano duro per la pasta. Nel frattempo il consumo pro capite è sceso a circa 180 kg.

Attualmente si ha una produzione sufficiente, ma con eccedenza di grano tenero e scarsità di grano duro poiché le zone a rese piú elevate si prestano tradizionalmente al grano tenero, mentre il grano duro trova il proprio ambiente nelle terre caldo-aride del Mezzogiorno. È bastato che il MEC accentuasse la differenziazione di prezzo già in uso fra grano tenero e duro per dar corso a una serie di iniziative tendenti a estendere la coltivazione del grano duro ovvero a aumentarne ancora di piú le rese.

Le ricerche italiane sono sempre state sia di ordine agronomico sia di ordine genetico. Dopo aver creato le varietà pregiate di grano tenero e di grano duro si cerca ora di spostare verso il Nord il grano avente i caratteri del duro e di ottenere la costituzione di nuove varietà di frumento meglio adatte ai vari ambienti e che abbiano in piú il dono della precocità e della resistenza alle avversità climatiche o patologiche.

Il fatto nuovo è la possibilità di estendere al frumento le pratiche di ibridazione in atto per il granturco in modo da avere la disponibilità di grandi masse di seme ibrido di prima generazione, quello che racchiude in sé la potenza riproduttiva della eterosi. Lo sviluppo produttivistico permetterà nuovi tipi di organizzazione agraria in cui troveranno piú spazio le colture foraggere. Cosí si potrà incrementare, come è necessario, anche l'allevamento di bestiame da carne.

La trappola per neutrini è costituita da un serbatoio riempito con 100 000 galloni (pari a 378 500 litri) di un comune detersivo, il tetracloroetilene. La trappola è collocata in una cavità rocciosa a 148 km sotto terra nella miniera Homestake a Lead, nel Sud Dakota. Le ricerche sono svolte da Raymond Davis jr., Kenneth C. Hoffman e Don S. Harmer del Brookhaven National Laboratory. Suggerito nel 1964 da Davis e dall'autore di questo articolo, l'esperimento è cominciato l'anno scorso. I primi risultati hanno dimostrato che l'emissione dal Sole di neutrini prodotti nel decadimento del boro-8 era inferiore al previsto.

Neutrini dal Sole

Molto al di sotto della superficie terrestre è stata collocata una trappola di grandissime dimensioni con la quale si cerca di catturare una parte dei neutrini che, secondo le previsioni, dovrebbero essere emessi dal Sole

di John N. Bahcall

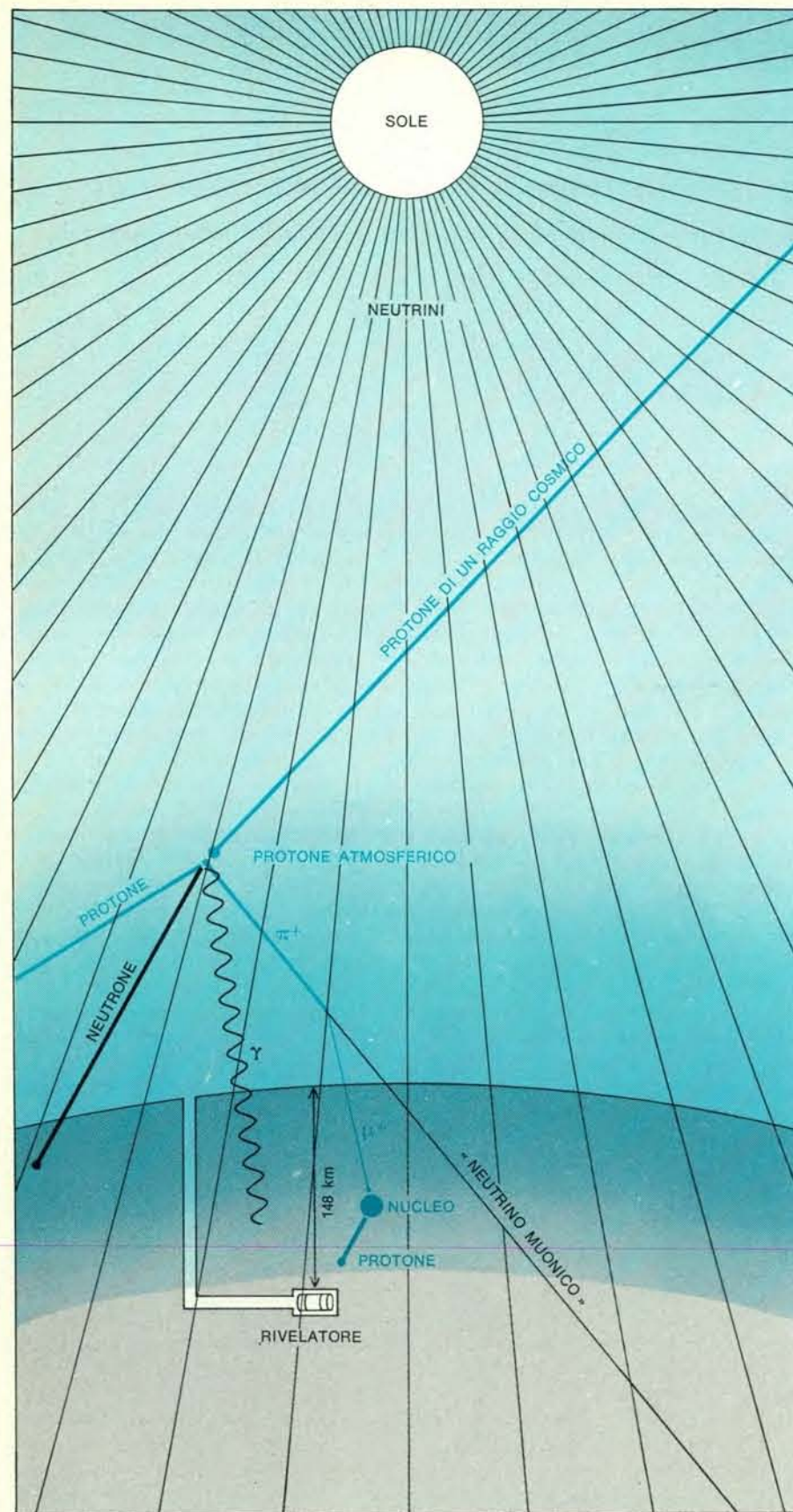
La maggior parte dei fisici e degli astronomi pensa che il calore del Sole sia dovuto a reazioni termonucleari in cui elementi leggeri si trasformano in elementi piú pesanti, con una conseguente conversione di massa di energia. Non è però ancor oggi facile dimostrare la fondatezza di questa ipotesi, formulata quasi 50 anni fa da Sir Arthur Eddington. La difficoltà principale consiste nel fatto che la fornace termonucleare del Sole si trova nella parte piú interna di questo e è nascosta da un'enorme massa piú fredda. Per questo motivo gli strumenti astronomici di tipo tradizionale, compresi quelli che sono stati collocati sui satelliti artificiali, sono tutt'al piú in grado di rivelare le particelle (soprattutto i fotoni) emesse dagli strati esterni del Sole.

Tra tutte le particelle prodotte nelle reazioni termonucleari che si suppone avvengano nell'interno del Sole, solo una, il neutrino, riesce a raggiungere la superficie solare, percorrendo una distanza di circa 640 000 km, e a sfuggire nello spazio. Queste particelle di massa nulla, che viaggiano alla velocità della luce, reagiscono cosí poco con le altre, che su 100 miliardi di particelle generate nel nucleo solare, solo una viene frenata o deviata durante il percorso fino alla superficie del Sole. I neutrini ci permettono quindi di « vedere » nell'interno del Sole, dato che sono gli unici a sfuggire nello spazio. Circa il 3 per cento dell'energia totale irraggiata dal Sole viene emessa in forma di neutrini. Sulla superficie terrestre, il flusso dei neutrini prodotti dal Sole è dell'ordine di 10^{11} al centimetro quadrato e al secondo. Purtroppo il fatto che i neutrini riescano cosí facilmente a sfuggire dal Sole significa anche che è molto difficile riuscire a catturarli.

L'anno scorso è però entrata in funzione una gigantesca trappola per neutrini, collocata in una caverna molto al di sotto della superficie terrestre nella miniera Homestake a Lead, nel Sud Dakota (USA). Questa trappola è stata riempita con 100 000 galloni (pari a circa 378 500 litri) di tetracloroetilene (C_2Cl_4), un comune fluido detergente. Gli esperimenti sono diretti da Raymond Davis jr. del Brookhaven National Laboratory, con l'aiuto di Kenneth C. Hoffman e Don S. Harmer. Nel 1964 con Davis siamo riusciti a dimostrare che era possibile ottenere prove sperimentali dell'ipotesi della combustione nucleare nelle stelle. Tra coloro che appoggiarono il nostro progetto ricordiamo William A. Fowler, del California Institute of Technology, e Maurice Goldhaber, direttore di Brookhaven. Successivamente abbiamo avuto, per la parte tecnica degli esperimenti, un rilevante contributo dalla Homestake Mining Company.

I primi risultati, pubblicati da Davis e collaboratori, lasciarono alquanto perplessi gli astronomi e gli astrofisici, poiché da essi risultava un valore molto basso per la velocità di flusso dei neutrini; essa risultava infatti pari a meno della metà del valore che si ottiene dai calcoli teorici fissando certi valori « standard » per le grandezze usate nella costruzione di modelli teorici dall'interno del Sole. Discuteremo piú oltre il limite di validità delle previsioni teoriche. È importante intanto sapere che abbiamo adesso a disposizione dei dati sperimentali che ci consentono di capire meglio il funzionamento del Sole.

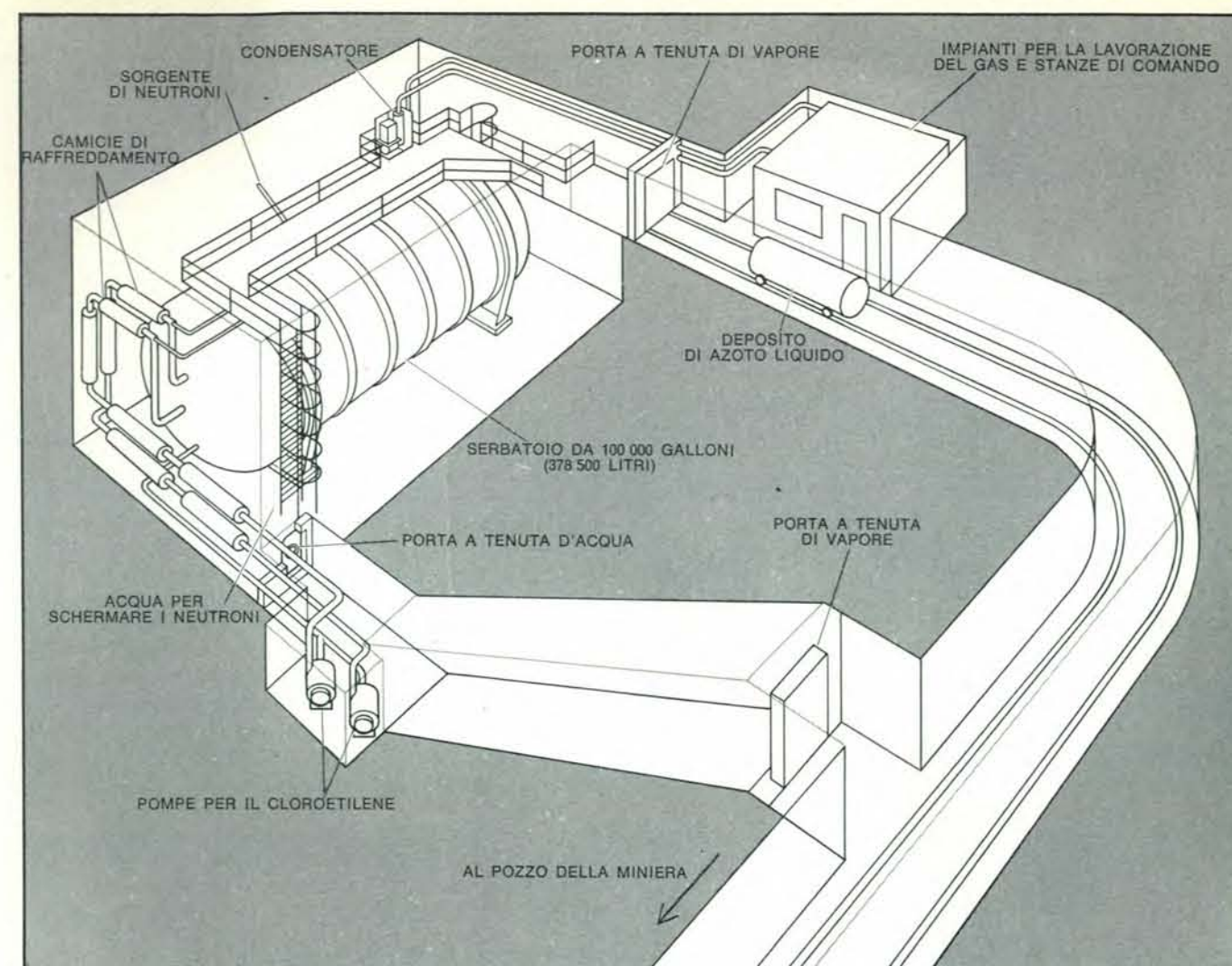
L'ipotesi dell'esistenza dei neutrini fu formulata per la prima volta nel 1931, quando si notò che nel decadimento radioattivo di alcuni nuclei sembravano sparire delle piccole quantità di massa. Pauli suggerí l'idea che questa massa fosse portata via in forma di energia da particelle di massa nulla, per le quali Fermi propose poi il nome di « neutrini ». Fermi costruí inoltre una teoria mediante la quale potevano venire interpretati quantitativamente i processi fisici a cui partecipano i neutrini. Nel 1956 Frederick Reines e Clyde L. Cowan jr. riuscirono a rivelare i neutrini servendosi di una complicata apparecchiatura installata nelle vicinanze di un grande reattore nucleare. Questo emette un enorme flusso di antineutrini, generati nel decadimento radioattivo dei prodotti della fissione. È ovvio infatti che l'esistenza di una particella può essere dimostrata dall'esistenza della corrispondente antiparticella.

Verso la fine degli anni trenta Hans A. Bethe, della Cornell University, riprese l'ipotesi di Eddington sull'origine nucleare dell'energia solare e fece anche notare come l'energia prodotta dalla fusione dei nuclei atomici sarebbe stata sufficiente per far brillare il Sole e le altre stelle per i miliardi di anni corrispondenti all'età dei meteoriti e delle rocce terrestri. La nascita, l'evoluzione e la morte delle stelle sono state studiate a fondo fin dagli anni trenta. È comunemente accettata l'ipotesi che il primo elemento costitutivo fondamentale dell'universo sia stato l'idrogeno. Secondo questa ipotesi, in determinate condizioni, gli atomi di idrogeno si addenserebbero in nuvole, o protostelle, dense abbastanza da contrarsi per effetto della propria forza di attrazione gravitazionale. La contrazione continuerebbe finché la pressione e la temperatura al centro della protostella raggiungono valori tali da fare iniziare le reazioni nucleari in cui i nuclei di idrogeno si combinano dando luogo alla formazione di nuclei di elio. Quando

Il rivelatore di neutrini è stato posto in profondità per essere schermato dal flusso di particelle prodotte quando i protoni dei raggi cosmici entrano in collisione con i nuclei atomici nell'atmosfera o sulla Terra. Qui un pione positivo (π^+) prodotto in una collisione atmosferica decade in un muone positivo (μ^+) e in un « neutrino muonico ». I muoni ad alta energia sono molto penetranti e possono estrarre i protoni dai nuclei atomici molto al di sotto della superficie terrestre. Se uno di questi protoni entrasse nel rivelatore di neutrini, simulerebbe l'entrata di un neutrino solare perché anche i protoni possono trasformare un atomo di cloro-37 in un atomo di argo-37.

l'idrogeno è quasi completamente consumato, la stella si contrae ulteriormente sotto l'azione della forza di gravità fino a quando il suo centro diventa tanto caldo da provocare la fusione dei nuclei di elio in elementi ancora piú pesanti. Il consumo del combustibile e la successiva contrazione continuano passando attraverso numerosi cicli.

Si pensa che il Sole si trovi attualmente nella prima fase di combustione nucleare. In questa fase quattro nuclei di idrogeno (protoni) si fondono assieme per formare un nucleo di elio, costituito da due protoni e due neutroni. In questo processo due cariche positive (portate da due dei quattro protoni) si trasformano in due elettroni positivi (che sono le antiparticelle degli elettroni). In questa fusione vengono liberati anche due neutrini e una certa quantità di energia in eccesso, circa 25 milioni di elettronvolt (MeV). Questa energia corrisponde alla quantità di massa persa nella reazione complessiva, dato che un nucleo di elio e due elettroni pesano un po' meno di quattro protoni. I 25 MeV di energia cosí liberati si ritrovano come energia cinetica delle particelle gassose della fornace solare e come fotoni (particelle di energia raggiante). Alla fine del processo questa energia si diffonde sulla superficie solare e da questa poi sfugge sotto forma di luce o di radiazioni non luminose.

I tedeschi Bethe e C. F. von Weizsäcker sono giunti per vie diverse a proporre una stessa descrizione del modo in cui la combinazione di quattro protoni dà luogo alla formazione di un nucleo di elio. Questa reazione è nota con il nome di ciclo CNO, poiché a essa prendono parte nuclei di carbonio, azoto e ossigeno (*si veda la figura a pagina 25*). Il ciclo ha inizio con un nucleo di carbonio $^{12}_{6}C$ (questo simbolo indica che il nucleo contiene 12 nucleoni, di cui sei sono protoni e il resto neutroni), al quale si aggiungono, uno alla volta, tre protoni, dando cosí luogo a un nucleo di azoto ($^{15}_{7}N$) che contiene otto neutroni e sette protoni. La aggiunta di un altro protone provoca una reazione in cui vengono prodotti due nuclei, il nucleo iniziale $^{12}_{6}C$ e il $^{4}_{2}He$, cioè l'elio.

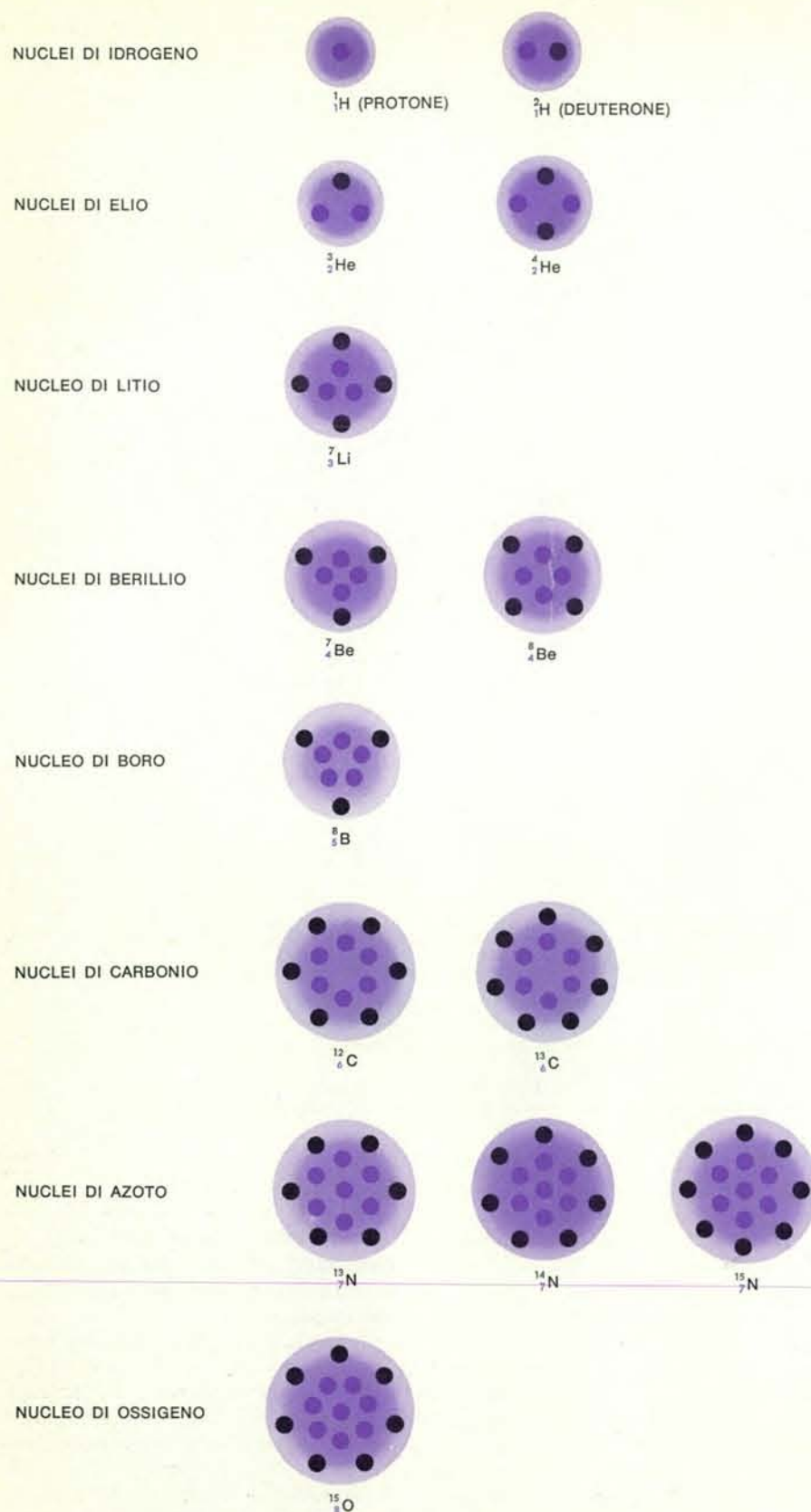
In ciascuna fase vengono emessi due neutrini le cui energie massime sono maggiori di 1 MeV. Uno dei due neutrini proviene dal decadimento radioattivo del ^{13}N e l'altro dal decadimento del ^{15}O (per semplicità trascureremo da qui in avanti l'indice in basso che indica il numero di protoni del nucleo). Le velocità delle reazioni nucleari del ciclo CNO che avvengono nelle stelle sono state accuratamente studiate in

Il rivelatore di neutrini solari è un serbatoio di 610 cm di diametro, lungo circa 1460 cm, che contiene 100 000 galloni di tetracloroetilene (C_2Cl_4). In media ogni molecola di C_2Cl_4 contiene un atomo dell'isotopo desiderato, $^{37}_{17}Cl$, che ha 17 protoni e 20 neutroni. Gli altri tre atomi di cloro contengono due neutroni in meno e vengono indicati con $^{35}_{17}Cl$. Quando un neutrino con la giusta energia reagisce con un atomo di $^{37}_{17}Cl$, produce un atomo di $^{37}_{18}Ar$ e un elettrone. Si lascia accumulare l'argo-37 radioattivo per diversi mesi, poi lo si rimuove spurgando il serbatoio con elio. Viene quindi analizzata la radioattività dell'argo-37.

questi ultimi venti anni nel W.K. Kellogg Radiation Laboratory del California Institute of Technology, prima sotto la direzione di Charles C. Lauritsen e ora sotto quella di Fowler.

Anche una serie completamente diversa di reazioni nucleari, note come catena protone-protone, studiate anche esse trenta anni fa da Bethe, può portare alla formazione di elio da quattro protoni (*si veda la figura a pagina 26*). Nel primo gradino della catena due protoni si combinano per formare un deuterone, ^{2}H, che è il nucleo dell'idrogeno pesante. Il deuterone si combina poi con un protone per formare un nucleo di elio leggero, ^{3}He. La reazione successiva può avvenire in tre direzioni diverse. Noi pensiamo che nel 91 per cento dei casi due nuclei di ^{3}He si combinino tra loro nell'interno del Sole per formare un nucleo di elio ordinario, ^{4}He, liberando due protoni. Le altre due strade possibili passano attraverso la formazione di nuclei di litio, berillio e boro (^{7}Li, ^{7}Be, ^{8}Be e ^{8}B), con formazione finale di due nuclei di elio.

Al tempo in cui Bethe studiò per la prima volta la catena protone-protone le conoscenze sperimentali sulle velocità delle principali reazioni nucleari erano molto scarse. Oggi, grazie agli studi compiuti in vari laboratori di tutto il mondo, disponiamo dei dati necessari per poter conoscere completamente la catena e i gradini attraverso cui questa passa. Date le basse energie che si pensa esistano nella fornace solare (alcune migliaia di elettronvolt), ogni singola reazione della catena protone-protone ha una probabilità molto bassa, e quindi difficile da misurare. Tuttavia il gruppo di ricercatori del Kellogg Laboratory, del quale hanno fatto parte anche studenti, ha portato questi difficili esperimenti a un tale livello di precisione che possiamo ora disporre della maggior parte delle informazioni necessarie per prevedere le velocità delle reazioni della catena protone-protone.

Tra le reazioni della catena protone-protone, tre sono particolarmente importanti negli esperimenti sui neutrini solari. Riferendoci ancora alla figura di pagina 26, esse sono: la reazione fondamentale protone-protone (*reazione 1*), la reazione protone-elettrone-protone, o « pep » (*reazione 2*), e il decadimento di un isotopo radioattivo del boro, ^{8}B (*reazione 10*). In tutte e tre le reazioni vengono prodotti neutrini, ma solo nella seconda e nella terza questi hanno un'energia sufficiente per innescare una reazione nel rivelatore a tetracloroetilene.

La reazione protone-protone è la piú lenta della catena protone-protone e

Si crede che le sorgenti dell'energia solare siano i nuclei atomici rappresentati simbolicamente in questa figura, che possono essere presenti sia come elementi che producono le reazioni sia come prodotti nella fornace termonucleare del Sole. Il combustibile principale è l'idrogeno comune, $^1_1$H, il cui nucleo è costituito da un solo protone. Quattro protoni possono fondersi in un nucleo di elio, $^4_2$He, attraverso due meccanismi principali, dei quali uno viene chiamato ciclo CNO perché in esso intervengono nuclei di carbonio, azoto e ossigeno (*si veda la figura nella pagina a fronte*), mentre nell'altro, noto come catena protone-protone, intervengono nuclei di elio, litio, berillio e boro (*si veda la figura a pagina 26*). I protoni sono rappresentati da cerchietti a colori, i neutroni da cerchietti neri, disposti arbitrariamente. Altre particelle che partecipano alla reazione sono gli elettroni (positivi e negativi), i fotoni e i neutrini.

quindi determina la velocità finale a cui viene prodotta l'energia. Purtroppo questa velocità è cosí bassa che non può essere misurata in laboratorio; la forza « debole » che governa queste reazioni è la stessa che determina le interazioni dei neutrini con la materia. In questi ultimi anni numerosi studiosi hanno fornito una valutazione teorica della velocità di questa reazione in condizioni stellari. L'anno scorso io e Robert M. May, dell'Università di Sidney, abbiamo fatto una nuova stima di questa velocità con un errore relativo che riteniamo non superiore al 5 %.

La reazione pep differisce dalla reazione fondamentale protone-protone solo per il fatto che in essa vi è un elettrone negativo all'inizio della reazione invece di un elettrone positivo alla fine. La sua velocità alle densità e alle temperature esistenti nel Sole è ancora piú bassa di quella della reazione protone-protone. Assieme a May abbiamo calcolato che in condizioni solari la reazione pep avviene una volta ogni 400 reazioni protone-protone. I neutrini pep, che hanno un'energia tre volte e mezzo maggiore di quella dei piú energetici neutrini protone-protone, dovrebbero essere appena al di sopra del limite di rivelabilità. Come vedremo, la loro velocità di cattura determina la velocità minima compatibile con l'ipotesi che il Sole possieda una fornace termonucleare.

La terza delle reazioni particolarmente impòrtanti, il decadimento del boro radioattivo, ^{8}B, produce i neutrini piú energetici, con una energia massima di 14,06 MeV, cioè quasi 10 volte l'energia massima dei neutrini pep. Il boro ^{8}B si forma con l'aggiunta di un protone al berillio ^{7}Be, ma questa reazione (*9*) della catena protone-protone avviene solo raramente. Essa ha inizio con la fusione di nuclei di elio leggero, ^{3}He, e di elio pesante, ^{4}He, che formano il ^{7}Be. Nel 1958 Harry D. Holmgren e R.L. Johnson del Naval Research Laboratory scoprirono che questa reazione è molto piú veloce di quanto si pensasse. Essa infatti si verifica nel Sole circa una volta ogni mille delle reazioni ^{3}He + ^{3}He piú probabili. Subito dopo questa scoperta Fowler e A.G.W. Cameron formularono la ipotesi che il decadimento del ^{8}B possa produrre un flusso rivelabile di neutrini solari. In seguito ho svolto alcuni calcoli che hanno dimostrato che la probabilità di cattura per i neutrini energetici emessi dal ^{8}B era 18 volte maggiore di quella calcolata in precedenza. Sulla base di questi calcoli, nel 1954 Davis propose di costruire gli impianti per le ricerche sperimentali che sono poi stati realizzati nella miniera Homestake.

Possiamo adesso chiederci in qual modo il tetracloroetilene possa venir usato come rivelatore per i neutrini solari. Circa 20 anni fa Bruno M. Pontecorvo, che allora era ai Chalk River Nuclear Laboratories in Canada, notò che un isotopo del cloro, il ^{37}Cl, poteva catturare un neutrino e trasformarsi in un isotopo di argo, il ^{37}Ar, liberando un elettrone. Successivamente questa ipotesi fu esaminata a fondo da Luis W. Alvarez dell'Università della California a Berkeley. Tenendo conto dei risultati di Alvarez, Davis e Harmer cercarono di osservare sperimentalmente l'argo prodotto dagli antineutrini nel decadimento dei prodotti di fissione. Avevano a questo scopo sistemato un rivelatore da 3000 galloni (pari a circa 11 350 litri) vicino a un reattore nucleare.

L'isotopo di argo prodotto nella cattura di un neutrino è instabile e si trasforma in ^{37}Cl catturando uno dei suoi stessi elettroni orbitali. Il 50 per cento degli atomi di un campione di ^{37}Ar si trasformano in questo modo nel giro di circa 35 giorni. Nel processo di decadimento dall'atomo di argo viene liberato un elettrone con bassa energia, che può essere rivelato da contatori disposti intorno al campione. La rivelazione di questi elettroni costituirebbe una prova del fatto che alcuni atomi di ^{37}Cl sono stati trasformati dai neutrini in atomi di ^{37}Ar. L'energia minima necessaria per questa reazione è di 0,81 MeV (*si veda la figura a pagina 27*).

Perché il sistema di rivelazione funzioni devono esservi almeno una dozzina di atomi di ^{37}Ar. I calcoli fatti fanno pensare che in un esperimento realizzabile in pratica sarebbe necessario un rivelatore costituito da 100 000 galloni di un fluido contenente cloro, come il tetracloroetilene (nel cloro naturale circa un quarto degli atomi sono atomi dell'isotopo ^{37}Cl). Nell'esperimento progettato da Davis e collaboratori questo volume di tetracloroetilene è contenuto in un serbatoio del diametro di 610 cm, lungo 1465 cm e collocato a una profondità di 148 km sotto terra (*si veda la figura a pagina 23*).

Perché sotto terra? Perché il rivelatore deve essere schermato dalla pioggia di particelle subnucleari di tutti i tipi prodotte quando i raggi cosmici, soprattutto protoni ad alta energia, precipitano nell'atmosfera terrestre (*si veda la figura a pagina 22*). Sono parecchie le reazioni provocate da queste particelle che potrebbero simulare la reazione che Davis cercava, ma è particolarmente importante escludere dal serbatoio i protoni liberi, perché se un atomo di ^{37}Cl assorbe un protone, può trasformarsi in ^{37}Ar liberando un neutrone. Anche se non è probabile che i protoni liberi possano penetrare attraverso molti metri di roccia, i muoni prodotti dai raggi cosmici sono però molto penetranti e possono provocare reazioni in cui vengono liberati dei protoni molti metri sotto la superficie. Per essere schermato anche contro i neutroni, che costituiscono un altro pericolo, l'intero serbatoio può essere circondato con acqua.

Il serbatoio di tetracloroetilene viene esposto al flusso di neutrini provenienti dal Sole per diversi mesi per consentire agli atomi di ^{37}Ar di accumularsi. (Si potrebbe aggiungere che presumibilmente il flusso di neutrini dal resto dell'universo sta con il flusso di neutrini solari nello stesso rapporto che vi è tra la luce delle stelle e la luce del Sole, e quindi esso può essere trascurato.) Il ^{37}Ar formato nella cattura dei neutrini viene quindi rimosso dalla massa del liquido facendo gorgogliare una grande quantità di elio attraverso il sistema. Circa 0,28 metri cubi di elio al minuto vengono fatti circolare nel serbatoio. L'argo viene separato dall'elio facendolo adsorbire in una trappola a carbone mantenuta alla temperatura dell'azoto liquido (77 °K). Il rendimento del procedimento di estrazione viene determinato in ciascun esperimento aggiungendo ai 100 000 galloni di tetracloroetilene una quantità nota (meno di 1 cm^3) di ^{36}Ar, che è un raro isotopo non radioattivo dell'argo. Davis ha riscontrato che, spurgando il serbatoio con elio per 22 ore, si ritrova di solito il 95 % di ^{36}Ar.

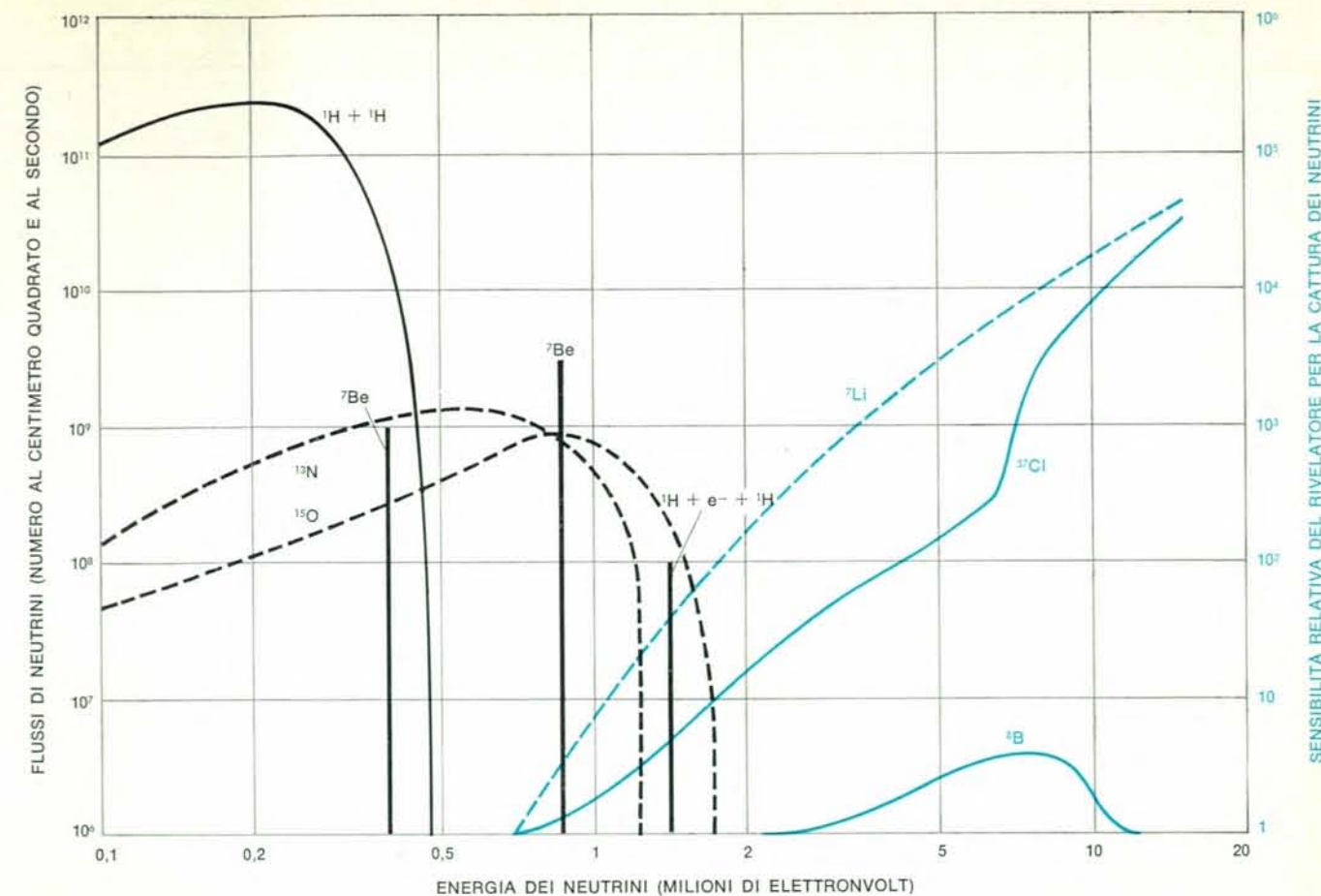
L'argo che viene alla fine rimosso dal serbatoio è costituito principalmente di ^{36}Ar, inserito appositamente, e di altri due isotopi: alcuni atomi di ^{37}Ar prodotti dai neutrini solari e una piccola quantità del normale isotopo non radioattivo dell'argo, ^{40}Ar, che potrebbe essere stato lasciato nel serbatoio dall'aria. Dopo che il campione di argo è stato purificato chimicamente, esso viene collocato in un piccolo contatore

1,74 MeV$_{(MAX)}$
1,20 MeV$_{(MAX)}$
e+ ELETTRONE (+)
Y FOTONE
V NEUTRINO

Nel ciclo CNO, in cui quattro protoni si fondono in un nucleo di elio, viene impiegato come catalizzatore il carbonio ordinario, $^{12}_6$C, che si ritrova poi di nuovo come prodotto finale della reazione. I neutrini vengono liberati nella seconda e nella quinta fase del ciclo. Dato che l'energia viene spartita tra gli elettroni positivi (emessi contemporaneamente ai neutrini) e i neutrini stessi, questi emergono con uno spettro di energie, di cui indichiamo in figura i valori massimi. Purtroppo molti dei neutrini prodotti nel ciclo non hanno l'energia sufficiente per far scattare il sistema di rivelazione basato sul cloro-37, che ha una soglia di 0,81 milioni di elettronvolt (MeV).

contenente circa 0,5 cm^3 di gas. Il contatore è di dimensioni ridotte per rendere minima la sua esposizione ai raggi cosmici o ad altre particelle non desiderate. Esso viene protetto dalle radiazioni esterne mediante una serie di schermi e di grandi contatori che segnalano quando qualcosa passa attraverso le protezioni esterne. La forma di ogni impulso che si ha nel contatore viene fotografata e i dati relativi (come il tempo in cui si è avuto l'impulso e la sua energia) sono memorizzati su un nastro di calcolatore. Ray Davis mi ha detto che l'esperimento è semplice (« è solo un lavoro da idraulici ») e che la chimica è « una cosa normale ». Suppongo che abbia ragione, ma come non chimico sono terrorizzato dalla grandezza del suo compito e dalla precisione con cui riesce a svolgerlo. Su un numero totale di atomi presenti nel grande serbatoio pari a circa 10^{30}, Davis riesce a trovare e a estrarre le poche dozzine di atomi di ^{37}Ar che possono essere state prodotte all'interno del serbatoio nella cattura di neutrini solari. Al confronto sembra facile anche cercare un ago in un pagliaio.

Spiegherò adesso come ho calcolato la probabilità che un atomo di ^{37}Cl catturi un neutrino solare che entra nel serbatoio di tetracloroetilene. La frazione di neutrini con energie contenute in ogni dato intervallo può essere determinata per una particolare sorgente di neutrini mediante esperimenti di laboratorio. Ci si può anche servire della teoria di Fermi sui processi in cui intervengono i neutrini per calcolare la probabilità che un atomo di ^{37}Cl catturi un neutrino. Da una probabilità limite pari a zero per un neutrino di 0,81 MeV, la probabilità relativa di cattura sale a 100 per un neutrino di 4 MeV, a 1000 per un neutrino di 7 MeV e a 30 000 per un neutrino di 14 MeV. Quindi le probabilità di catturare un neutrino di 14 MeV dal decadimento

Si pensa che la catena protone-protone sia la principale sorgente di energia nel Sole. La reazione iniziale protone-protone (*1*), che produce neutrini che non possono essere rivelati col cloro-37, determina la velocità di tutte le reazioni successive. I neutrini rivelabili sono liberati nella reazione pep (*2*), cosí chiamata perché i suoi elementi sono protone, elettrone e protone. I deuteroni, ^2_1H, prodotti in queste due reazioni si fondono con i protoni per formare l'isotopo leggero dell'elio ^3_2He (*3*). A questo punto la catena protone-protone si divide in tre rami. Nel secondo ramo vengono prodotti, mediante la reazione 6, alcuni neutrini appena dentro il limite di rivelabilità. I neutrini piú energetici vengono liberati (*10*) nel ramo in cui interviene il boro-8, ma ciò avviene di rado.

Lo spettro delle energie dei neutrini solari rappresentato mediante curve che mostrano la sensibilità del sistema di rivelazione basato sul ^{37}Cl oggi in uso (*linea continua in colore*) e la sensibilità di un nuovo sistema di rivelazione mediante litio, ^7Li (*linea tratteggiata in colore*). Nessuno di questi sistemi è sensibile nella regione inferiore a circa 0,8 MeV, in cui dovrebbe cadere l'energia della maggior parte dei neutrini solari. Il sistema con il litio sarebbe però piú sensibile di quello col ^{37}Cl ai neutrini prodotti nella reazione pep. La maggior parte dei neutrini che dovrebbero essere catturati dal ^{37}Cl sono quelli liberati nel decadimento del ^8B. I neutrini prodotti nella catena protone-protone sono indicati con linee nere continue, mentre quelli prodotti nel ciclo CNO sono indicati con linee tratteggiate. I flussi di neutrini sono dati in numero di neutrini al centimetro quadrato al secondo per MeV per le sorgenti continue e in numero di neutrini al cm^2 al secondo per le sorgenti lineari.

del ^8B è circa tremila volte maggiore della probabilità di catturare un neutrino di 1,4 MeV dalla reazione pep.

Inoltre, con i neutrini provenienti dal decadimento del ^8B si può ottenere un risultato non ottenibile con nessuno degli altri neutrini solari. Infatti essi sono cosí energetici da riuscire a produrre un nucleo di ^{37}Ar nello stato eccitato. Ciò significa che il nucleo ha piú energia interna di quanta ne avrebbe nello stato fondamentale, o normale. Il fatto importante è che i neutrini formati nel decadimento del ^8B possono provocare delle transizioni nucleari che non possono essere provocate dai neutrini con energie piú basse. Il piú importante stato eccitato del ^{37}Ar è molto simile allo stato fondamentale del ^{37}Cl, di cui si può considerare il corrispondente nucleare. Lo studio degli stati eccitati ha portato a una valutazione molto precisa della probabilità di cattura di un neutrino ^8B da parte del ^{37}Cl.

La strada seguita per interpretare i dati ottenuti parte da considerazioni basate sulle proprietà di simmetria dei nuclei contenenti lo stesso numero di nucleoni e procede nel modo che ora descriveremo. Il nucleo $^{37}_{17}Cl$ (indicando di nuovo con l'indice in basso il numero di protoni) dovrebbe avere un comportamento molto simile a quello del nucleo di calcio $^{37}_{20}Ca$, che non era ancora conosciuto quando ho costruito il mio modello nucleare. In questo modello prevedevo che il $^{37}_{20}Ca$ sarebbe decaduto, in un tempo in media non superiore a 130 millisecondi, in un nucleo eccitato di potassio $^{37}_{19}K$ piú un elettrone positivo e un neutrino. Questo decadimento può esser considerato il corrispondente nucleare della cattura di un neutrino da parte del $^{37}_{17}Cl$, nella quale vengono prodotti $^{37}_{18}Ar$ e un elettrone.

Circa un anno dopo queste mie previsioni, è stato sperimentalmente osservato l'isotopo ^{37}Ca e la sua velocità di decadimento è risultata pari al valore previsto con un errore relativo del 25 per cento. Ancora piú importante è il fatto che successive misure, effettuate da Arthur M. Poskanzer e dai suoi collaboratori a Brookhaven, consentirono di calcolare il numero di decadimenti del ^{37}Ca che portano a vari stati eccitati del ^{37}K. I dati ottenuti in queste misure erano proprio quelli che mancavano ancora per poter calcolare la velocità di cattura dei neutrini da parte del ^{37}Cl con una precisione superiore al 10 %.

È conveniente introdurre una unità di misura particolare per esprimere la velocità di cattura dei neutrini negli esperimenti sui neutrini solari. Questa unità è l'« unità neutrino solare », o SNU. Una SNU equivale a 10^{-36} catture al secondo per atomo bersaglio. Ciò significa che un atomo di ^{37}Cl deve aspettare 10^{36} secondi, approssimativamente 10 miliardi di miliardi di volte l'età dell'universo conosciuto, prima di catturare un neutrino. Ovviamente nel serbatoio da 100 000 galloni, che contiene circa 2×10^{30} atomi di ^{37}Cl, il

IPOTESI CHE PORTA AI VALORI PREVISTI	VELOCITÀ DI CATTURA PREVISTA (UNITÀ NEUTRINO SOLARE)
CICLO CARBONIO-AZOTO-OSSIGENO	35
CATENA p-p (S_{17} STANDARD)	6
CATENA p-p (S_{17} INDIRETTA)	3
TEORIE GENERALI SULL'INTERNO DEL SOLE	1-3
MINIMO ASSOLUTO (NEUTRINI « PEP »)	0,3

Per ognuna delle varie ipotesi fatte sui processi termonucleari nel Sole sono indicate in figura le velocità di cattura dei neutrini previste nel sistema di rivelazione mediante ^{37}Cl. Una unità neutrino solare (SNU) corrisponde a 10^{-36} catture al secondo per atomo bersaglio o, alternativamente, a una cattura per atomo ogni 10^{36} secondi. Se l'energia solare fosse dovuta tutta al ciclo CNO, la velocità prevista sarebbe di 35 SNU. Nell'articolo vengono esaminate le ipotesi che portano alle varie stime. Il primo valore ottenuto da Davis e dai suoi collaboratori indica un limite superiore di 3 SNU.

tempo medio per una sola cattura, se la velocità di cattura è 1 SNU, è di soli 5×10^5 secondi, cioè circa sei giorni per cattura.

Vediamo ora come varia la velocità di cattura (espressa in SNU) in funzione della reazione, o della combinazione di reazioni, che si considerano responsabili dell'energia termonucleare del Sole (*si veda la figura in questa pagina*). Secondo i miei calcoli, se il ciclo CNO è la principale sorgente dell'energia solare, la velocità di cattura è di 35 SNU. D'altra parte, se l'energia del Sole è dovuta tutta alla catena protone-protone, come oggi pensa la maggior parte dei fisici teorici, è difficile dare una valutazione della velocità di cattura. Per calcolare la velocità di cattura con una precisione di alcuni percento, come normalmente si richiede, sarebbe necessario costruire dei modelli esatti per l'interno del Sole e valutare la temperatura media della camera di combustione solare con una precisione dello 0,1 per cento.

Da un po' di tempo conosciamo le equazioni che servono per costruire questi modelli. La prima di queste equazioni stabilisce che l'attrazione gravitazionale del gas solare è equilibrata punto per punto dalla pressione termica esercitata dalle particelle di gas in movimento e dalla pressione della radiazione (fotoni). La seconda equazione stabilisce che l'energia totale emessa dal Sole rappresenta la somma di tutte le energie liberate nelle singole reazioni termonucleari. Vi è infine una terza equazione che descrive il modo in cui l'energia viene trasportata dall'interno del Sole alla sua superficie. Per poter scrivere questa equazione si deve però fare l'ipotesi che la materia di cui è costituito il Sole abbia una particolare composizione chimica, per poter così dare una valutazione della sua opacità (cioè della forza che essa oppone al passaggio dei fotoni dall'interno verso la superficie). Si suppone convenzionalmente che le abbondanze osservate con metodi spettroscopici alla superficie del Sole siano uguali a quelle che vi erano quando il Sole si è formato. Tuttavia contro questa ipotesi si è pronunciato Icko Iben jr., del Massachusetts Institute of Technology, che ha fatto notare come l'abbondanza originaria di elio che avevamo calcolato per il Sole sia diversa dall'abbondanza osservata per altre stelle. Anche se la situazione non è ancora del tutto chiara, siamo ugualmente stimolati a proseguire dal fatto che i nostri modelli ci permettono di calcolare correttamente l'abbondanza degli atomi di elio osservata nei raggi cosmici provenienti dal Sole.

Tutte le quantità nominate – pressione, velocità di reazione e opacità – devono essere calcolate a temperature circa 50 000 volte maggiori e a densità 100 volte maggiori di quelle che si trovano normalmente sulla Terra. Si pensa che la temperatura al centro del Sole sia di circa 15 milioni di gradi Kelvin e che la densità, sempre al centro, sia di circa 150 grammi al centimetro cubo. Per calcolare dei valori abbastanza precisi per l'opacità delle sostanze stellari sono stati necessari anni di studio da parte di Arthur N. Cox e dei suoi collaboratori del Los Alamos Scientific Laboratory.

Per calcolare un modello solare particolareggiato con un moderno calcolatore ad alta velocità sono necessari circa 10 minuti. I primi calcoli sul flusso dei neutrini solari, basati su particolareggiati modelli del Sole, furono pubblicati nel 1963 da Fowler, Iben, Richard L. Sears e da me stesso. Il modello da noi costruito nel 1963 forniva per la velocità di cattura un valore di circa 50 SNU. In seguito Sears si dedicò ad altre ricerche molto avanzate, sempre in questo campo. Da allora ho invece cercato di valutare e ridurre le incertezze che c'erano nei nostri calcoli e che erano dovute alla non completa conoscenza di alcuni parametri. Hanno collaborato a questa ricerca numerosi studiosi (compresa, in questi ultimi tempi, mia moglie Neta), tra cui Giora Shaviv e Roger Ulrich. Il migliore modello solare da noi costruito, con il quale abbiamo ottenuto quelli che riteniamo i valori più probabili per i parametri della catena protone-protone, fornisce per la velocità di cattura un valore di soli 6 SNU, valore minore di quello calcolato con il modello del 1963 di circa un fattore 10. La differenza principale tra le valutazioni fatte nel 1963 e quelle di oggi è dovuta alle più precise misure delle probabilità delle reazioni nucleari e della composizione del Sole (le ricerche sulla composizione solare sono state svolte da D. Lambert e A. Warner dell'Università di Oxford). Noi pensiamo che l'incertezza sul nuovo valore della velocità di cattura sia di un fattore due o tre.

Circa l'80 per cento della velocità prevista di 6 SNU rappresenta i neutrini prodotti nel decadimento del boro radioattivo, ^{8}B, che si forma quando il ^{7}Be cattura un protone. Il parametro che descrive la velocità di questa reazione alle temperature solari viene di solito indicato con S_{17} (dove 1 indica il protone e 7 il ^{7}Be). Il valore « standard » per S_{17} è stato determinato nel 1968 da Peter D. Parker della Yale University, e da questo valore abbiamo ottenuto per la velocità di cattura il valore 6 SNU. Alcuni anni prima era stata effettuata al Caltech da Thomas A. Tombrello una determinazione per via indiretta di S_{17} che aveva fornito un valore più basso. Tombrello aveva usato reazioni a cui partecipavano il ^{7}Li e neutroni invece del ^{7}Be e protoni. Se si usa questo valore più basso, il valore della velocità di cattura scende a 3 SNU. Indipendentemente dalle incertezze su S_{17} e su altri parametri, mia moglie, Ulrich e io abbiamo calcolato che usando le teorie più generali sull'interno del Sole si ottiene un valore probabile per la velocità di cattura compreso tra 1 e 3 SNU.

Calcolando i contributi dovuti ai soli neutrini pep si può ottenere un valore minimo per la velocità di cattura. Indipendentemente dal modello scelto per l'interno del Sole, il rapporto tra le reazioni pep e le normali reazioni protone-protone è di circa 1 a 400. Inoltre la luminosità del Sole osservata consente di determinare la velocità della reazione fondamentale protone-protone. Quindi la velocità di cattura attribuibile ai neutrini pep costituisce un limite inferiore assoluto (con una sola possibile eccezione di cui parleremo più avanti) compatibile con l'ipotesi che le reazioni di fusione siano quelle che producono la luminosità del Sole. I calcoli che ho svolto con l'aiuto di mia moglie, Shaviv e Ulrich, dimostrano che la minima velocità di cattura è di 0,29 ± 0,2 SNU.

I risultati pubblicati l'anno scorso da Davis e collaboratori dimostrano che la velocità di cattura col ^{37}Cl è probabilmente inferiore a 3 SNU. Il valore sperimentale implica chiaramente che meno del 10 per cento dell'energia solare è generata dal ciclo CNO. Esso implica inoltre che il valore 6 SNU, ottenuto in base alla scelta di parametri « standard » per la catena protone-protone, è almeno due volte troppo alto. Questa discrepanza di un fattore due ha provocato una notevole eccitazione nell'ambiente scientifico. Tuttavia, come abbiamo visto, le incertezze su alcuni parametri sono abbastanza grandi perché i risultati di Davis non debbano essere necessariamente in contrasto con le teorie generali finora formulate sull'interno del Sole.

Il sistema di estrazione dell'argo è collocato sotto terra vicino alla trappola per neutrini da 100 000 galloni. Attraverso il serbatoio viene fatto circolare elio per rimuovere tutti gli atomi di ^{37}Ar formati dal ^{37}Cl. Il rendimento dell'estrazione si determina inserendo preventivamente nel serbatoio una piccola quantità di ^{36}Ar, che è un raro isotopo non radioattivo dell'argo. L'elio e l'argo passano attraverso l'apertura a sinistra, dove l'argo si condensa in una trappola a carbone raffreddata con azoto liquido. Questa frazione di argo viene purificata nell'apparecchiatura a destra. Il campione purificato viene poi inviato a Brookhaven, dove con contatori si determina il contenuto di ^{37}Ar.

Ciononostante diversi teorici hanno suggerito dei metodi per spiegare l'apparente discrepanza. D. Ezer e Cameron della NASA hanno fatto l'ipotesi che le parti interne del Sole si siano in parte mescolate con le parti esterne, riducendo così le differenze di composizione attribuibili alle reazioni nucleari all'interno del Sole. Su questa ipotesi sono stati svolti studi quantitativi da numerosi ricercatori, che hanno trovato che un eventuale mescolamento potrebbe in effetti ridurre notevolmente il flusso previsto di neutrini solari. La loro ipotesi tuttavia non è comunemente accettata perché la quantità e la durata di mescolamento necessarie sono troppo grandi.

L'idea più fantasiosa è arrivata dall'Unione Sovietica, dove V. N. Gribov e Pontecorvo (che era stato il primo a suggerire l'uso del ^{37}Cl per catturare i neutrini) hanno formulato l'ipotesi che i neutrini abbiano una specie di doppia identità: per circa la metà del tempo essi si comporterebbero come i soliti « neutrini elettronici » che supponiamo che siano, ma per l'altra metà sarebbero « neutrini muonici ». I neutrini muonici sono stati scoperti a Brookhaven nel 1962; essi si formano in reazioni in cui si ha la produzione di muoni. Sembra che essi siano identici ai normali neutrini elettronici tranne che per il fatto che quando reagiscono con un protone o con un neutrone essi producono un altro muone anziché un elettrone. Si può anche dimostrare che i neutrini muonici a bassa energia non reagiscono col ^{37}Cl. Secondo Gribov e Pontecorvo, la trasformazione da un tipo di neutrino all'altro richiede tempi (o distanze) che sono disponibili per i neutrini che viaggiano dal Sole alla Terra. I neutrini che arrivano sotto forma muonica non possono essere rivelati e quindi tutte le velocità di cattura devono essere divise per due. L'ipotesi di Gribov e Pontecorvo implica che la velocità di cattura minima dovuta ai neutrini pep debba essere ridotta. Non sarà facile verificare questa strana ipotesi, ma non per questo essa può essere respinta con noncuranza.

Nel frattempo Davis sta cercando di migliorare la sensibilità del suo esperimento. Se vi riuscisse, deciderebbe chiaramente se l'attuale discrepanza tra i valori osservati e quelli previsti è dovuta a errori su qualcuno dei parametri determinati sperimentalmente che usiamo nei nostri modelli o se è dovuta a qualche errore esistente alla base delle nostre teorie. Oltre a ciò credo che si dovrebbe compiere un esperimento usando una specie nucleare più sensibile del ^{37}Cl ai neutrini a bassa energia. Un tale nucleo potrebbe essere il ^{37}Li; catturando un neutrino esso porta alla formazione di ^{37}Be e di un elettrone (cioè questa è la reazione inversa della reazione 6 mostrata a pagina 26). Il litio dovrebbe essere molto più sensibile del ^{37}Cl ai neutrini pep di 1,4 MeV (*si veda la figura alla pagina di fronte*) e ai neutrini a bassa energia prodotti nel decadimento del ^{13}N e del ^{15}O nel ciclo CNO. Combinando i risultati ottenuti negli esperimenti col ^{37}Cl e col ^{7}Li si potrebbe avere una dimostrazione definitiva delle teorie oggi esistenti sull'interno delle stelle e sulle reazioni in cui intervengono i neutrini. Non sarei troppo sorpreso di ritrovarmi da qui a qualche anno a scrivere un altro articolo in cui spiego perché i risultati di un esperimento con il ^{7}Li non sono in accordo con le nostre previsioni di astrofisici.

Analisi dei trasporti urbani

Modelli di città analizzati mediante calcolatori elettronici indicano che già oggi può essere piú economico installare nuovi sistemi basati su «trasporti individuali» anziché sistemi tradizionali come la metropolitana

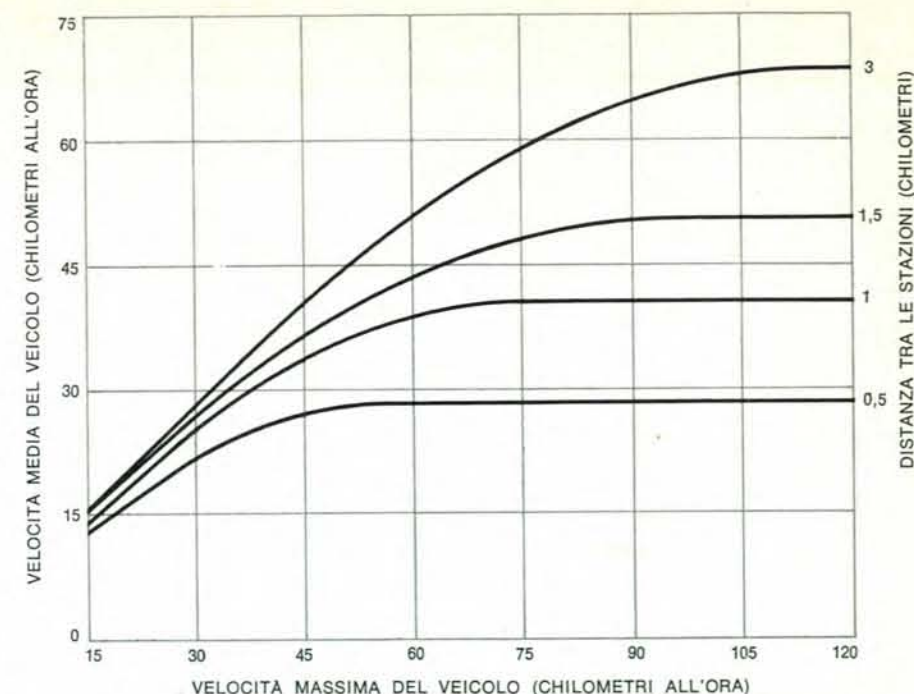
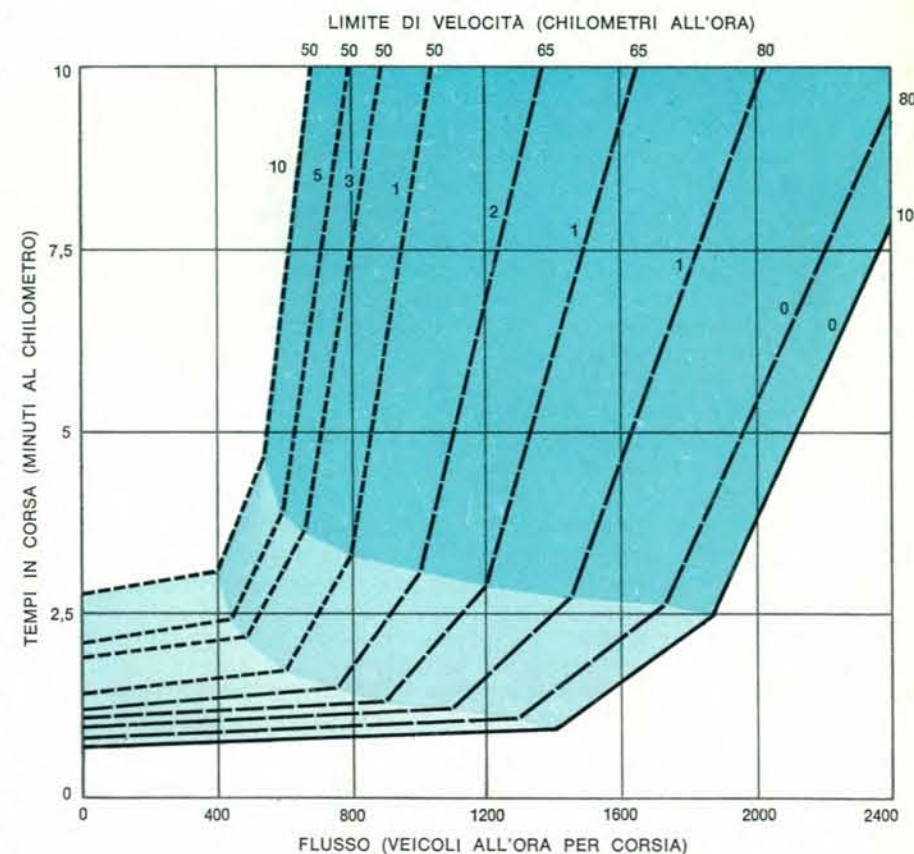
di William F. Hamilton II e Dana K. Nance

Ci si rende sempre piú conto che molti mali che colpiscono le città degli Stati Uniti derivano dal problema dei trasporti all'interno delle metropoli. Nonostante l'automobile abbia fornito agli americani una mobilità senza precedenti, la dilagante tendenza all'uso dei veicoli privati, a discapito dei mezzi pubblici, ha creato un nuovo complesso di difficoltà per la vita urbana. Il prezzo che viene pagato per coloro che utilizzano i vantaggi di autonomia e comodità forniti dall'automobile, è enorme. Esso comprende la saturazione delle città da parte di automezzi e di strade a scorrimento veloce, la congestione, l'alta percentuale di incidenti stradali e l'inquinamento atmosferico. Una non meno grave conseguenza dell'uso dell'automobile, che si tende generalmente a trascurare, deriva dal grave aumento dello sviluppo a macchia d'olio che produce l'inconveniente di isolare una gran parte di popolazione. In una metropoli che copra una vasta estensione, gran parte della quale non servita da trasporti pubblici, le persone che non sono economicamente in grado di possedere un'automobile o che non possono guidare, vengono private della mobilità necessaria per consentire loro un completo accesso ai benefici che la città offre, sia come possibilità di lavoro, sia come attrattive culturali e sociali.

Questi « poveri di trasporto » costituiscono una percentuale di popolazione molto piú vasta di quanto si è generalmente portati a considerare. La metà di tutte le famiglie degli Stati Uniti con reddito inferiore ai 4000 dollari, la metà di tutte le famiglie negre e la metà delle famiglie costituite da persone al di sopra dei 65 anni non posseggono l'automobile. Anche nelle famiglie che ne posseggono una, essa, spesso, non è a disposizione della moglie e dei figli, poiché viene usata da chi lavora per recarsi al suo posto di impiego. I giovani, gli anziani, i minorati fisici, tutti coloro che per una ragione o per un'altra non possono guidare, devono essere annoverati tra i « poveri di trasporto », in una città sempre piú orientata verso l'incremento dell'automobile. Va osservato che 100 milioni di americani, metà dell'intera popolazione, non possiedono la patente di guida.

La gravità del problema dei trasporti urbani ha indotto, tre anni fa, il Congresso a invitare il Department of Housing & Urban Development (HUD) a esaminare a fondo il problema. La HUD assegnò 17 incarichi di studio a un vasto gruppo di esperti: tecnici di trasporti, laboratori universitari, istituti di ricerche e organizzazioni di ricerche industriali. Il nostro gruppo, il General Research Corporation di Santa Barbara specializzato nella disciplina nota come « analisi dei sistemi », era stato incaricato di applicare questa tecnica al problema dei trasporti, considerando il complesso globale dei vari mezzi di trasporto come un sistema integrato. Dal punto di vista del metodo analitico, il nostro studio era abbastanza simile ad altri fatti in precedenza sull'argomento. La sua originalità era dovuta al fatto che prendeva in esame non solo i sistemi di trasporto esistenti, ma anche quelli eventualmente realizzati in futuro; inoltre analizzava a fondo, nei dettagli, costi e profitti.

Cominciammo a costruire un modello matematico di trasporti urbani e a provare, con l'aiuto di un grande calcolatore elettronico, l'efficienza e i costi di varie possibili interconnessioni. L'analisi dei sistemi costituisce un metodo molto generale che serve ad affrontare l'esame di un sistema complesso, esplorando l'influsso reciproco delle sue varie parti. Si « esplora » ogni parte per osservare ciò che succede al complesso, quando tutte le parti vengono prese in considerazione. Quando il sistema non esiste e sarebbe troppo costoso e rischioso costruirlo per eseguire un'indagine basata sull'esperimentazione diretta, l'analista cerca di costruire un modello che lo rappresenti, ed effettua le prove su di esso. Il piú delle volte il modello si rivela una serie di equazioni che si possono risolvere insieme. Per un sistema di una certa complessità, il modello è di solito cosí complicato da richiedere un calcolatore elettronico ad alta velocità.

Il nostro scopo era di simulare tutte le soluzioni piú importanti, attuali e potenziali, per il trasporto di persone in un'area urbana. Noi non cercavamo di progettare un particolare sistema ottimale; ma ci accingevamo piuttosto a esaminare varie combinazioni di possibili soluzioni, per vedere come avrebbe funzionato il sistema nel suo insieme. Per rendere il nostro modello il piú realistico possibile, era evidentemente preferibile utilizzare dati rilevati da città reali, piuttosto che da una ipotetica città media. Abbiamo quindi deciso di impostare uno studio introduttivo prendendo in considerazione come modelli quattro città tipiche. Sulla base di un'accurata analisi di fattori ottenuti da dati di censimento, abbiamo scelto: Boston, come esempio di grande città fortemente orientata verso il trasporto pubblico; Houston, come grande città orientata verso l'automobile privata; New Haven e Tucson come esempi corrispondenti di città piú piccole (con popolazione tra i 200 000 e i 400 000 abitanti). Queste quattro città

La velocità media di una metropolitana è determinata dalla distanza tra le stazioni e dall'accelerazione che i passeggeri possono tollerare. Si presume che l'accelerazione massima tollerabile sia di circa 5 km/h al secondo e che le fermate abbiano una durata di 20 secondi. Cosí, quale che sia la velocità massima di un treno, la media (se il percorso tra le stazioni è di km 1,5) non riesce a superare 55 chilometri all'ora. Anche potenziati, gli impianti tradizionali non possono superare questo limite caratteristico.

Nei modelli matematici le capienze delle strade sono rappresentate dalle equazioni di queste linee. Con flusso di traffico lento (*colore piú chiaro*) i fattori principali sono la velocità e il numero al chilometro di incroci con semaforo (*numeri all'interno del diagramma*). Il settore centrale (*colore intermedio*) è regolato principalmente dalla densità dei veicoli. Quando il flusso eccede la capienza delle strade (*colore piú scuro*) la curva è calcolata in base alla teoria delle code. I dati che si riferiscono a strade reali sono rilevati da piante di città. Il numero degli incroci indicato è approssimativo.

Adeguare il sistema delle infrastrutture di trasporto delle aree urbanizzate alla crescente domanda di mobilità costituisce uno dei problemi fondamentali della moderna scienza del traffico. In questa prospettiva è possibile identificare due tendenze: una che punta al miglioramento dei sistemi base mediante aggiunta di infrastrutture e mezzi di trasporto di tipo tradizionale, ma perfezionati (ferrovie rapide, autostrade urbane, ecc.); l'altra che propone il ricorso a modi di trasporto di concezione del tutto nuova. A questa seconda concezione è da riportare il trasporto pubblico individuale (*personal transit*) che, secondo le previsioni, dovrebbe muovere a una velocità di circa 100 km/h su un sistema di guidovie urbane utilizzabili anche da parte delle auto private opportunamente strutturate ed equipaggiate. La scelta dell'una o dell'altra alternativa dipende ovviamente dal tipo di struttura urbana considerata.

La soluzione proposta non è di tipo fantascientifico – ma appartiene alla sfera del futuribile in termini di fattibilità. Però dall'analisi è risultato che la fattibilità del nuovo sistema di « trasporto pubblico individuale » risulta limitata, per motivi economici, alle grandi città, e, in particolare, a quelle città fino a oggi prive di sistemi di trasporto rapido di massa tradizionale e inoltre orientate verso il trasporto automobilistico. Invece, i benefici di una migliore organizzazione della città e di una piú efficiente funzionalità del sistema dei trasporti, sarebbero validi in generale.

Volendo esprimere un parere sulla utilità del sistema di « trasporto pubblico individuale » per le città europee (cui Boston somiglia molto), si resta alquanto perplessi. Per quanto riguarda l'Italia, senza voler apparire troppo scettici, si osserva che si deve anche tenere conto che, nelle grandi aree metropolitane, è ormai avviato un processo di sviluppo di sistemi di trasporto di massa di tipo tradizionale, i quali richiedono considerevoli impegni finanziari che costituiranno, per molti anni a venire, una remora insuperabile a una riforma radicale delle reti di trasporto. Per le piccole città, che in Italia sono numerose e per le quali le reti di trasporto su ferro in sede propria non risultano utilizzabili per motivi di redditività degli investimenti, la risposta circa le possibilità di utilizzazione di un sistema di trasporto del tipo « trasporto pubblico individuale » sembra negativa (con riferimento ai risultati dell'analisi dei casi di Tucson e New Haven); il problema della scelta di un efficiente sistema di trasporto urbanisticamente integrato, per questa categoria di città, resta pertanto ancora aperto.

Un ipotetico trasporto pubblico individuale unirebbe la velocità e la libertà dell'automobile ai vantaggi dei trasporti su rotaia. Un passeggero, entrato in una rete di guidovia automatica a una data stazione, verrebbe portato a destinazione da un piccolo veicolo, senza fermate, a una velocità che potrebbe raggiungere i 100 chilometri all'ora. Anche le normali automobili, opportunamente attrezzate, potrebbero accedere alla guidovia per mezzo di una rampa, offrendo al guidatore un trasporto rapido, sicuro e non faticoso. Un duplice uso di questo tipo renderebbe possibile l'estensione del sistema alle zone urbane periferiche.

offrivano il sostanziale vantaggio di aver ciascuna fatto eseguire poco prima un'indagine dettagliata sui flussi di traffico; in tal modo esse fornivano non solo dati necessari alla formazione del nostro modello, ma anche quelli per il controllo dei risultati degli esperimenti eseguiti su di esso.

La formulazione del modello per ciascuna città iniziava con una descrizione delle infrastrutture di trasporto esistenti e prendeva in considerazione le domande di trasporto dei loro abitanti sia al presente sia in futuro. Noi abbiamo fornito all'elaboratore elettronico i dati riguardanti le strade, le vie di scorrimento veloce, i servizi di autobus e ferroviari (se esistenti). Ai fini della valutazione dei sistemi esistenti e dei possibili miglioramenti futuri, il modello doveva prendere in considerazione un gran numero di dati demografici e tecnici: la densità della popolazione, il reddito medio per unità familiare in ogni zona della città, la localizzazione delle zone commerciali e residenziali, i flussi del traffico sui percorsi nelle ore di punta, in che modo la velocità del flusso su ogni percorso subisce l'influenza del numero di veicoli che lo percorrono, la quantità di aria inquinata generata da ciascun tipo di veicolo e infine molti altri fattori dai quali dipende la determinazione dei costi e dei profitti di un sistema di trasporti.

Iniziando da elaborati del calcolatore che valutavano le prestazioni del sistema esistente, abbiamo proceduto a configurare progressivamente sistemi sempre piú avanzati e abbiamo confrontato le loro relative prestazioni. In tutto abbiamo analizzato circa 200 modelli, ciascuno dotato di un grandissimo numero di dettagli e ciascuno richiedente circa un'ora di elaborazione da parte del nostro calcolatore. Questo progetto occupò un grande numero di specialisti: tecnici, urbanisti, matematici, sociologi, economisti e programmatori di calcolatori. Per dare un'idea della quantità di lavoro che ha richiesto questo studio, basti dire che il nostro rapporto finale, steso da sette autori, nonostante i nostri tentativi di essere sintetici, consiste di 500 000 parole.

Man mano che il nostro studio procedeva, i risultati indicavano che le strategie possibili per il miglioramento dei trasporti urbani si potevano classificare in due categorie nettamente differenziate dal punto di vista dell'efficienza. La prima era una soluzione che noi chiamammo « graduale ». Essa consisteva nell'apportare migliorie alle esistenti attrezzature di trasporto. Queste, per esempio, comprendevano l'ammodernamento e la estensione di vecchie linee di metropolitana, la costruzione di nuove; la progettazione ex novo degli autobus, per renderli meno rumorosi, di piú facile accesso, e per accelerare il loro movimento; la dotazione delle automobili con dispositivi capaci di minimizzare l'inquinamento atmosferico, e cosí via. L'altra soluzione, da noi chiamata « nuove tecniche », consisteva nel passare decisamente ad attrezzature di trasporto completamente nuove, implicanti la creazione di nuovi tipi di veicoli e delle loro reciproche connessioni. La nostra analisi sui modelli ha indicato, come dimostreremo in seguito, che la « soluzione graduale » non avrebbe potuto far fronte alle necessità dei futuri trasporti urbani, mentre le « nuove tecniche », che si venivano delineando, davano la speranza di poterlo fare.

Esaminiamo brevemente alcuni fra i piú promettenti concetti di queste nuove tecniche. I tecnici hanno proposto un sistema chiamato « trasporto pubblico individuale » (*personal transit*) che funzionerà come una ferrovia ma che potrà trasportare, a stazioni di loro scelta, passeggeri singoli o piccoli gruppi senza fermate intermedie. I veicoli saranno piccoli e funzioneranno elettricamente, porteranno dalle due alle quattro persone, e si muoveranno su di una rete automatizzata di piste chiamate « guidovie ». Tutte le stazioni saranno poste su piste laterali in deviazione dalla linea principale (*si veda la figura in alto*). Il passeggero entrerà in una vettura in sosta a una data stazione, premerà su di una tastiera il pulsante corrispondente alla sua destinazione e verrà cosí condotto alla stazione selezionata, senza altra azione da parte sua, nessun trasbordo, nessuna fermata intermedia, nessuna attesa e nessuna necessità di guidare. Con questo sistema si prevede di poter trasportare un passeggero dal punto di partenza fino alla sua destinazione a una velocità media di circa 100 chilometri all'ora, contro l'attuale velocità media, di circa 30 chilometri all'ora includendo anche le fermate, raggiunta dalle metropolitane degli Stati Uniti.

Le guidovie potrebbero essere progettate in modo da consentire anche il trasporto di automobili sia private che pubbliche, permettendo a un automobilista che giunga in città di inserirsi nella guidovia in corrispondenza a una stazione e di dirigersi velocemente verso qualsiasi punto del centro urbano. L'inserimento dell'automobile in una guidovia potrebbe avvenire, sia mediante il trasporto « a navetta » su carrelli a fondo piatto di automobili di tipo tradizionale, sia inserendo nelle automobili stesse un dispositivo speciale che permetta loro di essere « guidate » dalla guidovia stessa. La possibilità di utilizzare le guidovie in modo doppio, sia con automobili, sia con passeggeri trasportati da piccoli veicoli pubblici, potrebbe rendere finanziariamente possibile la estensione della rete di guidovie all'hinterland di un'area metropolitana.

In alcuni sistemi di trasporti, analizzati nei nostri modelli e implicanti la nuova tecnologia, abbiamo anche ipotizzato delle automobili completamente nuove, studiate in modo da ottenere un massimo di sicurezza e un minimo di inquinamento atmosferico. Queste automobili, con motore a vapore, costituiscono un'alternativa possibile al tipo di veicolo che potrebbe entrare in combinazione con il sistema di « trasporto pubblico individuale ». In contrasto con le migliorie previste dalla « soluzione graduale », come cruscotti imbottiti o dispositivi per la riduzione dello smog inseriti nei motori a combustione interna, le nuove automobili ridurrebbero drasticamente le conseguenze degli incidenti stradali ed eliminerebbero completamente l'inquinamento atmosferico. D'altra parte questo tipo di vettura non contribuirebbe a coprire il costo delle attrezzature per un « trasporto pubblico individuale », né ad alleviare la gravosa necessità della guida, perché non consentirebbe automatismi nemmeno parziali.

Per le zone residenziali periferiche, il problema del trasporto dei cittadini dalle loro abitazioni alla locale stazione della guidovia o della ferrovia di tipo tradizionale, può trovare un'interessante soluzione col sistema detto « chiamata autobus » (*Dial-A-Bus*). Questo consiste nell'impiego di piccoli autobus (da otto a venti passeggeri) e fornisce un servizio « porta a porta » a un prezzo sostanzialmente inferiore a quello dei taxi. Una persona che si accinga a recarsi in città, dovrà semplicemente chiamare il servizio autobus, e sarà raccolta davanti alla porta di casa e condotta in pochi minuti alla piú vicina stazione. Nello stesso momento in cui le chiamate giungeranno alla centrale, esse verranno analizzate da un calcolatore elettronico, il quale indicherà in continuazione agli autobus circolanti il percorso più idoneo ad accelerare il prelievo di persone, in relazione allo sviluppo delle chiamate. La tecnologia dei calcolatori elettronici è già abbastanza avanzata per permettere a un simile sistema di funzionare. Il sistema potrebbe essere sperimentato immediatamente su larga scala, in collegamento con le esistenti ferrovie suburbane. Il sistema « chiamata autobus » sarebbe d'altra parte maggiormente efficiente se collegato con una rete di guidovie a « trasporto pubblico individuale ».

Per gli spostamenti a corto raggio nelle zone centrali densamente popolate, si rendono necessari sistemi più veloci degli autobus e più economici dei taxi. Una proposta ormai classica è rappresentata dai marciapiedi mobili. Ma, a meno che si trovino sistemi di accesso e di uscita migliori di quelli finora proposti, risulterebbero utili solo a coloro che si accontentano di spostarsi a una velocità di circa 3 chilometri all'ora o per persone dotate di una discreta agilità. Una versione in piccola scala di guidovie a « trasporto individuale », potrebbe costituire una soluzione più pratica del problema. In questo sistema le « piste » dovrebbero stare al di sopra del livello stradale, per evitare interferenze con l'altro traffico. Il passeggero entrerebbe nella capsula personale (a uno o due posti) a un punto di raccordo, premerebbe il pulsante relativo alla sua destinazione e viaggerebbe verso di essa a una velocità di circa 25 chilometri all'ora. Questo sistema potrebbe presentarsi molto compatto e poco rumoroso.

I tecnici concordano generalmente nel considerare questi sistemi, e specificatamente quelli a « trasporto pubblico individuale » e a « capsula personale », nell'ordine delle cose oggi realizzabili. Esistono problemi di sicurezza e di regolarità di funzionamento che devono essere risolti e bisogna prendere delle decisioni circa i metodi più adatti di propulsione, di sospensione e di controllo. Ma non vi è dubbio che un sistema basato sulle innovazioni qui descritte, potrebbe funzionare tra pochi anni.

Il grande problema non è stabilire se questo sistema *può* essere attuato, ma se *deve* esserlo. Il nuovo sistema richiederebbe di essere sviluppato per parecchi anni e non vi possono essere garanzie che, una volta ultimato, non venga meno alle sue promesse. Nel frattempo le città richiedono urgentemente soluzioni immediate alle loro crisi di trasporto. Non sarebbe forse più saggio adottare la soluzione graduale, orientando gli investimenti verso autobus perfezionati, migliori programmazioni e magari una rete di trasporti veloci, piuttosto che spendere milioni di dollari per un sistema non sperimentato, che in ogni caso non porterebbe sollievo alle nostre città se non negli anni futuri? Questa era la questione più importante alla quale hanno cercato di dare una risposta le nostre indagini sulle varie alternative. La nostra analisi dei sistemi ha tentato di confrontare il più obiettivamente possibile queste alternative in termini di costi definibili e di vantaggi sia sociali sia finanziari.

L'elemento centrale del nostro modello era una rete rappresentante i trasporti di una città. L'analisi dei flussi su questa rete non è altro che uno sviluppo della teoria matematica dei grafi. In astratto la teoria può essere cosí enunciata: data una serie di « nodi » (punti) collegati con una serie di « archi » (linee) aventi un costo specifico proporzionale a ogni arco, come effettuare ogni spostamento da nodo a nodo al minimo costo, tenendo conto di tutti gli altri spostamenti? Nella nostra rete ogni nodo rappresentava un quartiere o « zona » della città esaminata (per la precisione il nodo veniva definito quale baricentro della popolazione nel quartiere), ogni arco rappresentava la capacità di carico delle strade urbane che portano il traffico da un nodo a quello successivo. Oltre alle strade urbane, aggiungemmo degli archi separati che rappresentavano le vie di scorrimento veloce, le linee ferroviarie, i percorsi degli autobus, gli spostamenti pedonali e le zone necessarie per accedere ai mezzi di trasporto, elementi tutti che dovevano essere presi in considerazione per calcolare i costi minimi di spostamento da un nodo a un altro. La nostra base di misura del « costo » era il tempo necessario per percorrere un arco, il quale dipende non solo dalla lunghezza di questo, ma anche dal numero di persone che si trovano su di esso contemporaneamente. Noi partivamo dal presupposto, considerandolo ragionevole, che le persone generalmente prendono la via più veloce tra i diversi punti (la quale non è necessariamente la più breve rispetto alla distanza).

Un sistema di trasporti urbani implica migliaia di diverse destinazioni, dozzine di modi per raggiungerle e migliaia di scelte possibili da parte di un individuo. Per quanto potente sia un grande calcolatore elettronico, esso può elaborare in un'ora solo un certo numero di calcoli. Nel nostro programma il calcolatore era stato limitato ad analizzare fino a un massimo di 200 zone, 1500 nodi e 5000 archi. Perciò abbiamo dovuto dividere ogni nostra città modello in non piú di 200 zone. Abbiamo diversificato le dimensioni delle zone, limitandole ad appena qualche isolato nel centro urbano con alta densità e dilatandole in sezioni sostanzialmente piú vaste nelle aree lontane dal centro. Il criterio adottato per determinare le dimensioni delle zone si basava sulla considerazione che gli spostamenti all'interno della stessa zona fossero trascurabili al confronto di quelli da zona a zona. Abbiamo anche dovuto fare varie altre semplificazioni.

Tra queste la piú critica riguardava il probabile comportamento dei singoli individui davanti alla scelta del percorso e dei mezzi da adottare. Per fare una previsione esatta dei flussi di traffico da zona a zona nella rete avremmo dovuto avere a disposizione risposte a una serie di domande specifiche. Un ipotetico residente, dovendosi recare nel centro urbano, avrebbe preso un autobus, vi sarebbe andato con la propria automobile o facendosi accompagnare dalla moglie alla fermata della metropolitana? Quanta strada sarebbe stato disposto a percorrere a piedi, in una giornata di inverno, un operaio con stipendio annuo di 5000 dollari, abitante a Boston nella zona 27, pur di risparmiare un quarto di dollaro di biglietto? Quale intensità di congestione avrebbe dovuto raggiungere il traffico perché un individuo, che avesse pensato di fare uno spostamento non indispensabile, decidesse di rinunciarvi? Se avessimo avuto delle informazioni dettagliate di questo tipo, avremmo potuto determinare tutti i singoli casi, incanalando ogni persona sul percorso che gli sarebbe costato meno come tempo, denaro e disturbo, o, come dicono gli economisti, che gli avrebbe consentito « di minimizzare i tempi inutili ».

Mancando di dati sufficientemente dettagliati su tali questioni, noi, per poter fare delle previsioni di comportamento, abbiamo preso in esame alcuni criteri di base che si sono poi dimostrati ragionevolmente attendibili. In primo luogo abbiamo applicato una formula semplice, già sviluppata dalla Traffic Research Corporation e considerata valida da studi sul traffico in varie città, per determinare, in ogni zona residenziale, quale percentuale di popolazione si sarebbe orientata verso i trasporti pubblici e quale verso i trasporti privati. (La formula determina questa « scelta decisionale » sulla base della media dei redditi familiari di ogni zona, della quantità di tempo necessaria per raggiungere la destinazione prevista, utilizzando i due metodi di trasporto e dei relativi « tempi parassiti » impiegati nel camminare e aspettare.) In secondo luogo abbiamo considerato che tra l'uno e l'altro dei due sistemi, pubblico o privato, ogni viaggiatore avrebbe scelto sicuramente il percorso che avesse ridotto al minimo il tempo totale di spostamento.

Dopo aver cosí messo a punto un programma per calcolare i flussi di traffico previsti da zona a zona in una rete urbana in condizioni determinate, abbiamo inserito nel calcolatore i dati per ciascuna città onde calcolare il flusso nella rete urbana sotto svariate domande di trasporto. La procedura era « iterativa » e richiedeva una serie di prove e riprove per arrivare a una determinazione definitiva dei flussi. Il programma iniziava calcolando il tempo di percorrenza di ogni arco in condizioni normali di traffico. In seguito prendeva in esame una per volta le zone di destinazione e calcolava il percorso piú veloce per raggiungere ognuna di esse, con partenza da ciascuna delle altre. Introduceva, poi, per ciascun percorso il fattore di complessità corrispondente al numero di passeggeri che rispettivamente avrebbe usato i trasporti pubblici e quelli privati. Fatto ciò per tutti gli archi, il programma tornava all'inizio e ricalcolava i tempi di trasporto sulla base dei flussi di traffico risultanti dagli esperimenti precedenti. Erano necessarie in media cinque iterazioni di questo tipo per ottenere un quadro stabile del flusso di traffico, tale che non subisse mutamenti nelle prove successive.

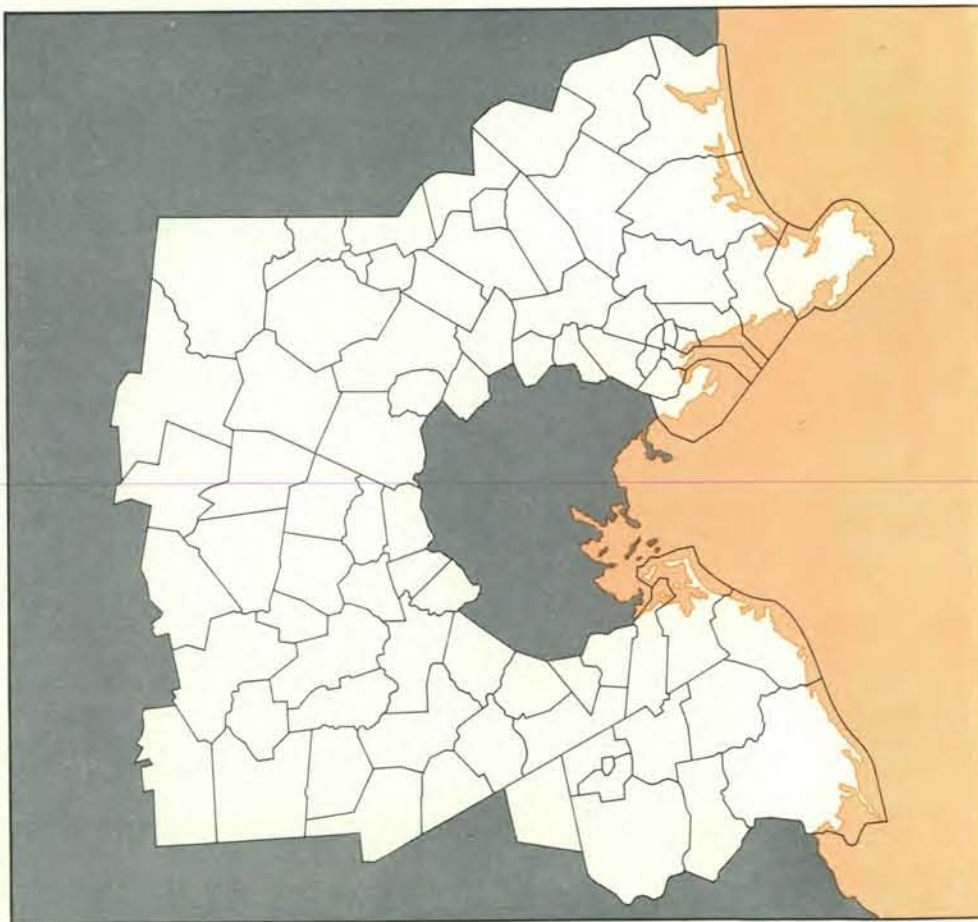
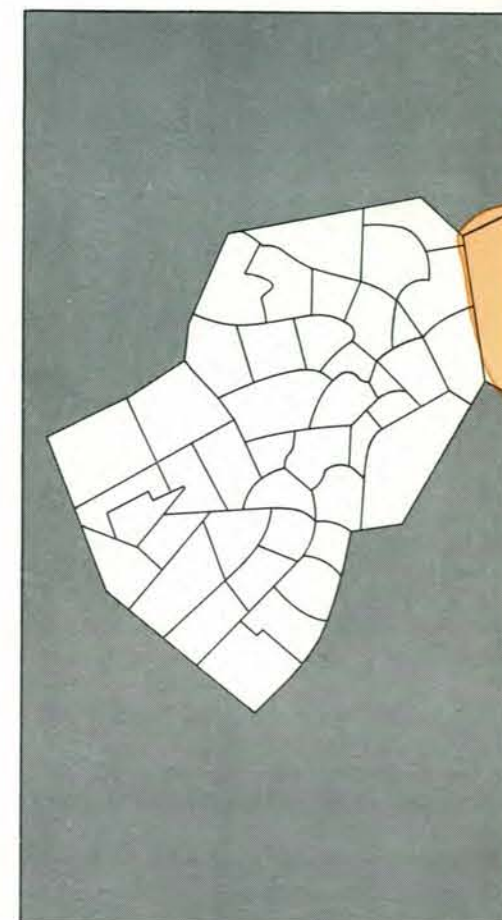
Per ottenere una valutazione quantitativa di quali benefici si sarebbero potuti ricavare per mezzo di miglioramenti apportati al sistema, abbiamo programmato non solo i metodi di trasporto esistenti, ma anche alcuni possibili futuri, che comportavano caratteristiche di flusso totalmente differenti. Il programma comprendeva anche un certo numero di sottoprogrammi che stabilivano i costi e i profitti di ciascun sistema, sia in termini sociali, sia di velocità e di economia di trasporto. Tra i fattori da noi introdotti nei calcoli vi erano l'inquinamento atmosferico, la penetrazione delle automobili nella città, l'accessibilità alle zone chiave e la mobilità dei residenti nei quartieri popolari. In questo modo il sistema di trasporto migliore non risultava necessariamente essere il piú economico o il piú veloce.

Evidentemente nessun modello è attendibile se si trascurano i suoi fattori decisivi o se le sue ipotesi di base sono sbagliate. Che fiducia potevamo avere nel modello generale che determinammo alla fine? Per fortuna esso superò tutte le prove di controllo a cui potemmo sottoporlo.

In primo luogo, mentre il lavoro procedeva, eravamo in grado di avere una visione globale delle ipotesi di base, analizzandole separatamente per controllare come avrebbero potuto influenzare i risultati e nello stesso tempo incoraggiando ciascun tecnico a criticare il lavoro degli altri. Abbiamo cosí avuto parecchie riunioni molto animate e abbiamo dovuto eliminare molti elaborati del calcolatore, prima di scegliere un modello di cui fidarci.

Infatti lo schema di flusso di traffico che avevamo sviluppato sulla base delle nostre esperienze di studio su sistemi completamente diversi, si dimostrò molto simile ai modelli ideati dai tecnici dei trasporti ai fini della pianificazione del traffico. Poiché le loro idee non ci erano note prima, il fatto di arrivare circa agli stessi metodi di previsione ci rese considerevolmente fiduciosi di essere sulla buona strada. Inoltre notammo che il nostro programma di flussi nella rete di traffico riproduceva un quadro di quanto era già conosciuto in situazioni specifiche. Abbiamo già accennato al fatto che ciascuna delle quattro città da noi assunte quale campione era stata di recente sottoposta a una dettagliata rilevazione di traffico. Questi studi avevano registrato la velocità media della circolazione lungo le direttrici principali, il numero delle persone che usufruiscono dei mezzi di trasporto pubblico, i tempi dei vari spostamenti nella città e cosí via. Per provare la capacità di previsione del nostro programma di flussi nella rete di traffico, noi vi abbiamo introdotto le caratteristiche riguardanti la popolazione urbana e la rete stradale, aggiornate all'epoca di detta rilevazione, e abbiamo lasciato che il programma determinasse il flusso secondo il suo metodo. In ogni singolo caso i risultati del calcolatore corrispondevano esattamente ai dati reali che erano stati ottenuti dalla rilevazione diretta sul posto; ci siamo sentiti perciò confortati nel constatare che il nostro modello rappresentava realisticamente il flusso di traffico di una città.

Ulteriori convalide alla utilità, in generale, del nostro modello, emersero quando incominciammo a sperimentare le soluzioni alternative sul metodo di trattare il problema dei trasporti urbani. Per ciascuna delle nostre quattro città campione, il risultato delle analisi metteva in evidenza la stessa conclusione basilare: la possibilità di risolvere le esigenze future delle città si identificava nello sviluppo di un nuovo sistema di trasporti, anziché nel limitarsi a migliorare e a potenziare i sistemi attuali.

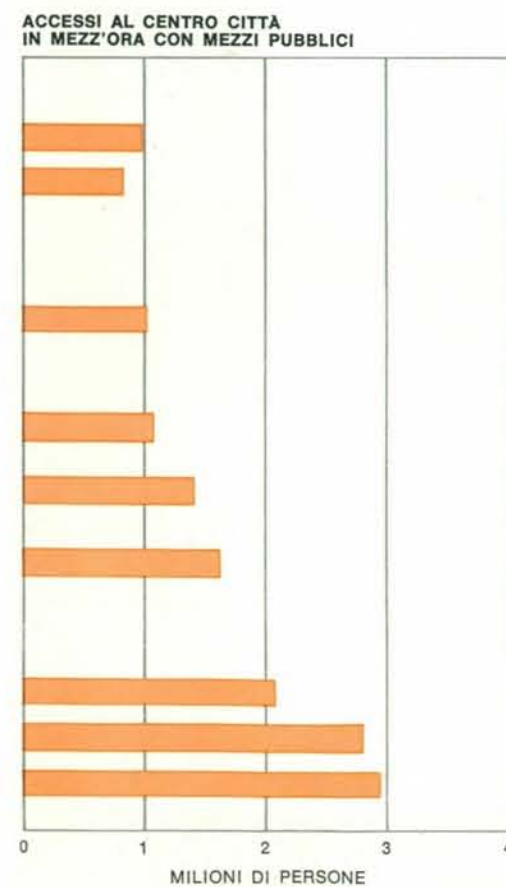
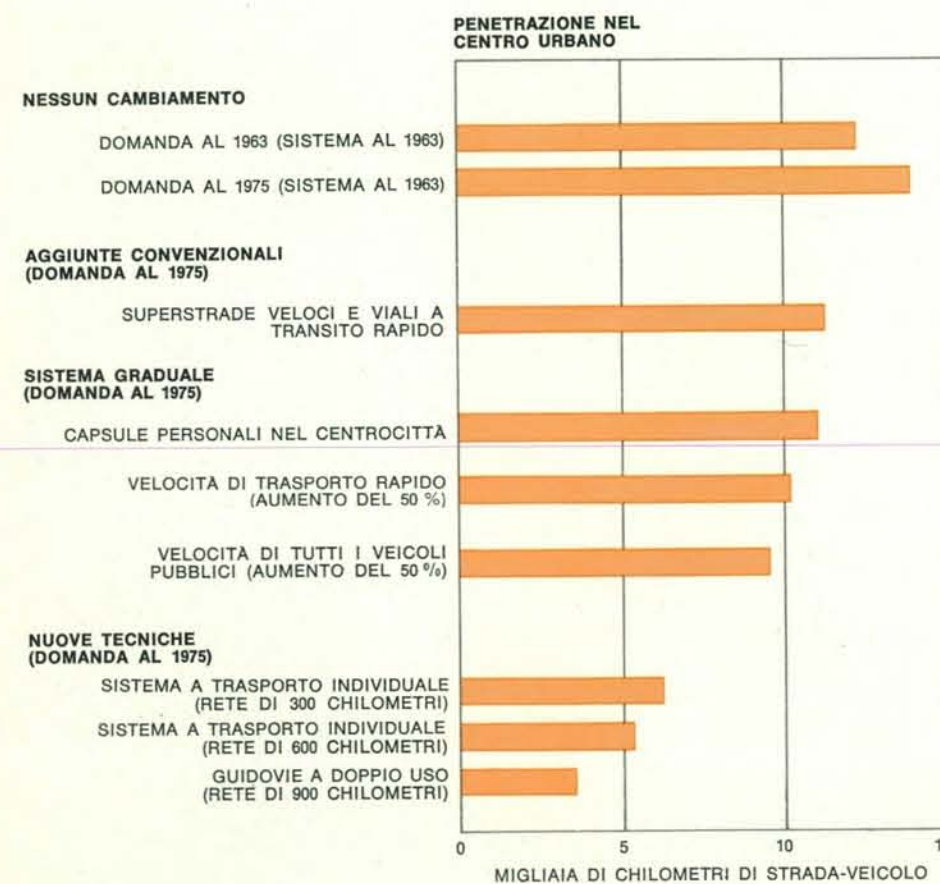
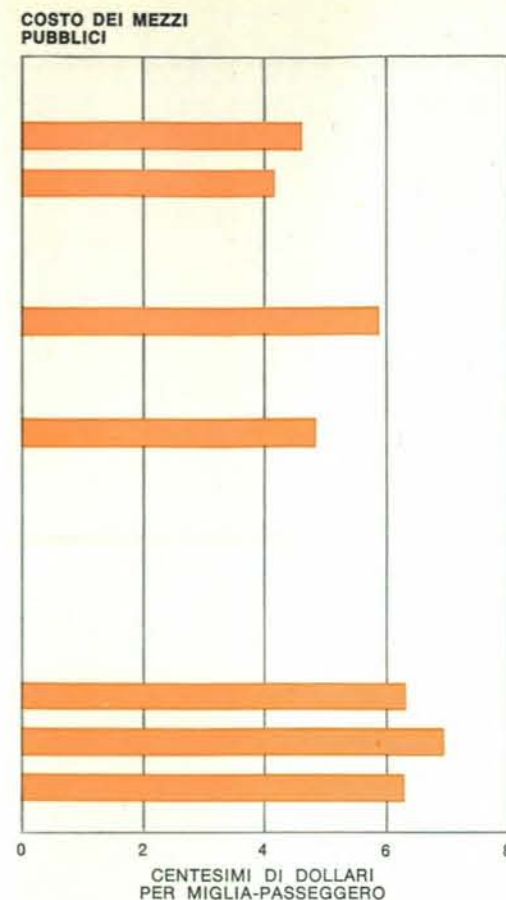
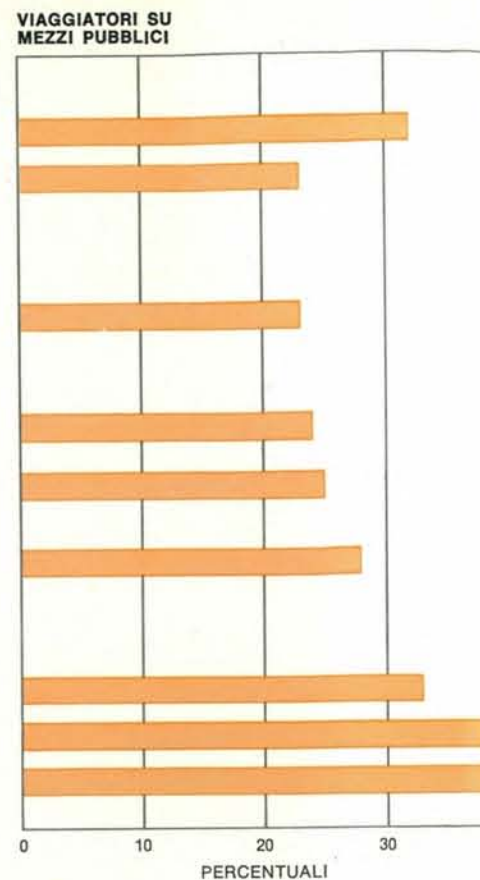
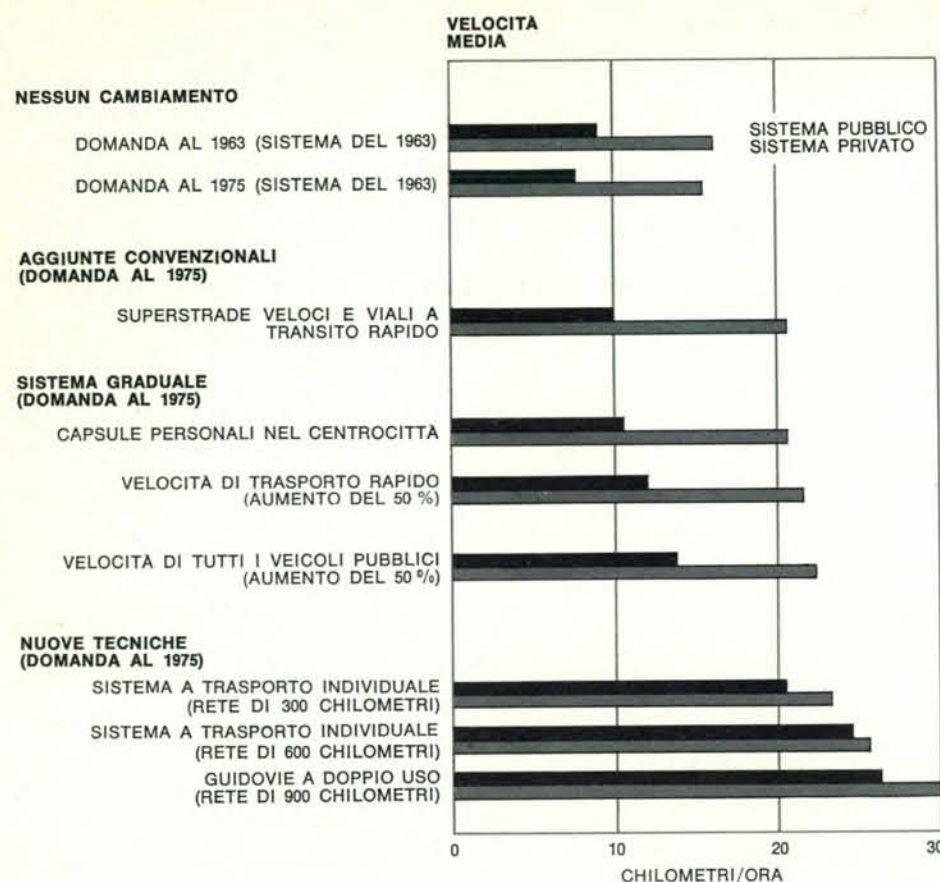
Un compendio delle nostre analisi dei vari sistemi in funzione a Boston servirà a illustrare le nostre conclusioni. Prendiamo lo spunto dalla situazione esistente nel 1963 (*si veda l'illustrazione a pag. 38*). In quell'anno la

La suddivisione in zone di traffico del distretto urbano di Boston è servita da base per il nostro modello (*si veda l'illustrazione a pag. 36*). Boston è una tipica grande città orientata verso il trasporto pubblico. La dimensione di una zona varia secondo la densità della popolazione e il relativo contributo al traffico generale: nel centro è spesso soltanto qualche isolato. Il numero delle zone (200) copre una superficie di 5957 km².

velocità media, porta a porta, dei passeggeri sui pubblici trasporti durante le ore di punta, era di 15 chilometri all'ora, e quella media degli automobilisti privati di 26,2 chilometri all'ora. Il 32 per cento della popolazione usava i trasporti pubblici nelle ore di punta e le vie del centro erano congestionate dal traffico. In seguito, abbiamo studiato quale sarebbe stata la situazione nel 1975, qualora non si fossero apportati cambiamenti ai sistemi di trasporto e il traffico raggiungesse il limite previsto dal Boston Regional Planning Project. I nostri calcoli indicarono che la velocità del traffico pubblico sarebbe scesa a 12,5 chilometri all'ora e quella del traffico automobilistico a 25,1 chilometri all'ora. L'uso dei mezzi pubblici sarebbe sceso al 23 per cento e la concentrazione del traffico automobilistico che si inserisce nel centro della città si sarebbe incrementata di piú del 15 per cento. (In una disastrosa giornata del 1963, il traffico nel centro di Boston raggiunse un livello di congestione tale da paralizzare completamente la circolazione per varie ore.)

Procedemmo quindi a considerare gli effetti dei possibili miglioramenti alla rete di trasporti. Mediante costose aggiunte di strade a scorrimento veloce e prevedendo estensioni dei trasporti rapidi che la città di Boston aveva in progetto di costruire entro il 1975, si poteva prevedere qualche miglioramento di velocità in rapporto alla situazione 1963 (fino a 15 chilometri all'ora per i mezzi pubblici e a 35 per quelli privati) e una relativa minore congestione del traffico automobilistico nelle strade del centro. La sostituzione degli autobus con capsule personali su percorsi a breve raggio nel centro urbano, avrebbe prodotto modesti vantaggi aggiuntivi, quali una piccola riduzione del costo netto dei trasporti. Per controllare quali conseguenze si sarebbero avute se i mezzi pubblici fossero stati considerevolmente accelerati mediante migliorie ai sistemi tradizionali, applicammo al nostro programma, come ipotesi arbitraria, un incremento della loro velocità pari al 50 per cento (senza tener conto dei costi). Accogliendo questa ipotesi (che rappresenta l'incremento massimo di velocità ottenibile sulle basi di qualsiasi proposta attuale) notammo che anche la circolazione automobilistica sarebbe stata accelerata notevolmente, poiché un maggior numero di persone avrebbe usufruito dei trasporti pubblici e sarebbe diminuita di conseguenza la congestione sulle strade a scorrimento veloce e nelle vie cittadine. L'incremento percentuale nell'uso dei mezzi pubblici sarebbe risultato comunque abbastanza modesto e ciò indica che un piano di investimento che consenta solamente di incrementare la velocità dei mezzi pubblici di tipo tradizionale non copre le sue spese a meno che non lo si possa contenere in costi molto bassi.

Quando abbiamo iniziato a esaminare sistemi che includevano reti di trasporto per mezzo di guidovie, abbiamo notato dei miglioramenti nel servizio davvero sorprendenti. Non solo la velocità aumentava di colpo, specialmente nel trasporto pubblico, ma anche un maggior numero di passeggeri tendeva a preferire quest'ultimo. Qualora nei nostri calcoli avessimo inserito anche i fattori di comodità e di privatezza che il trasporto individuale offre in confronto ai mezzi tradizionali, la percentuale di viaggiatori attratta verso il settore pubblico sarebbe ancora aumentata. Inoltre, adottando una rete di guidovie, la penetrazione e la congestione dei veicoli nel centro cittadino verrebbe a ridursi a meno della metà rispetto alla media del 1963. L'installazione di una rete di trasporto pubblico individuale lunga 600 chilometri nella regione di Boston accelererebbe la circolazione dei mezzi pubblici a una media di 39 chilometri all'ora e quella delle macchine private a una media di 41 chilometri all'ora; inoltre, nel 1975 il 38 per cento dei cittadini userebbe i trasporti pubblici. Qualora la rete venisse estesa a 900 km, e si prevedesse anche il trasporto di automobili private sulle guidovie, la velocità media di circolazione e l'uso dei mezzi pubblici aumenterebbero ancora.

Ma ben piú importanti di queste migliorie, sono gli indiscutibili vantaggi che il sistema di trasporto individuale fornirebbe sotto forma di mobilità ai « poveri di trasporto » delle città. La rete di 600 chilometri, che noi abbiamo previsto per il 1975, renderebbe accessibili a persone che vivono nel centro urbano, circa 204 000 posti di lavoro nelle zone limitrofe alla città, con non piú di mezz'ora di viaggio; attualmente queste zone non sono praticamente raggiungibili. Questa rete renderebbe anche accessibile a milioni di abitanti dei sobborghi tanto il centro urbano, quanto l'aeroporto, l'università e gli ospedali, anche durante le ore di punta. La nostra valutazione globale dei costi e dei profitti del sistema indicava ulteriori vantaggi, quali la riduzione degli incidenti stradali e dell'inquinamento atmosferico. In generale, dai risultati della nostra analisi risultava chiaramente che, anche secondo le piú ottimistiche previsioni sui benefici realizzabili migliorando i metodi di trasporto esistenti, questi non avrebbero potuto mai soddisfare le reali necessità delle nostre città dal punto di vista dei servizi. L'automobile, anche qualora venisse radicalmente ristudiata sotto il profilo della sicurezza e dell'eliminazione dei gas di scarico mediante propulsione a vapore, presenterebbe sem-

Questa rete simula i trasporti urbani in termini di nodi (punti) e di archi (linee). Una zona nodo rappresenta il baricentro della popolazione di una zona di traffico e anche l'inizio e la fine di un itinerario. Sono qui rappresentati schematicamente due itinerari diversi partenti ciascuno dalla zona nodo a sinistra e terminanti in quella di destra. Un itinerario usufruisce sia del trasporto detto « chiamata autobus » (un ipotetico sistema porta a porta con il quale l'autobus viene istradato dalle chiamate telefoniche degli eventuali clienti) sia del trasporto individualizzato che potrebbe servire il centro di una zona urbana, mantenendo una velocità di 25 chilometri all'ora. Il secondo itinerario è invece interamente automobilistico. Le lunghezze relative delle linee non sono indicative. I trasporti di Boston sono stati progettati sulla base di una rete di flusso simile a questa.

Per valutare le prestazioni di una rete stradale si è usato un programma di calcolo che impiega una serie di iterazioni per elaborare il flusso di traffico nella rete stessa. Il programma prima calcola i tempi di percorso lungo ciascun arco in condizioni di traffico non congestionato. In seguito, quando è stato calcolato il percorso piú veloce tra ciascuna zona e tutte le altre, il programma introduce per ogni percorso il fattore complicante della « scelta decisionale », cioè la percentuale di passeggeri trasportati da mezzi pubblici. Qualora queste cifre non possano entrare nella capienza del percorso piú breve, il programma torna indietro e calcola il percorso piú breve immediatamente successivo. Dopo la prima iterazione il programma calcola l'influenza che subiscono i tempi di viaggio dal flusso loro assegnato nelle precedenti iterazioni. L'esclusione degli archi « saturati » è un artificio di calcolo per evitare che tutto il flusso segua solamente pochi percorsi durante le prime iterazioni.

Questi indici, estratti dalle conclusioni degli autori, indicano il comportamento dei diversi sistemi di trasporto nel caso di Boston. Tutti i dati, a eccezione ovviamente dei costi dei mezzi pubblici, si riferiscono a percorsi effettuati nelle ore di punta.

La voce «penetrazione nel centro urbano» si riferisce alle automobili private.

pre l'irrimediabile svantaggio di richiedere la guida dell'utente e di non essere disponibile a un'alta percentuale di persone. Gli autobus e i treni, per quanto veloci, comodi e ben organizzati, hanno un limite inevitabile nella velocità media, data la necessità di frequenti fermate. Nel suo complesso il nostro studio indicava chiaramente che miglioramenti del tipo graduale non sarebbero stati sufficienti: nel migliore dei casi sarebbe solo un costoso palliativo agli inconvenienti dei trasporti urbani.

D'altra parte le nostre analisi sulle soluzioni offerte dalle nuove tecniche, e in particolare dal sistema di trasporto pubblico individuale, dimostravano che queste erano in grado di fornire delle migliorie veramente sostanziali ai servizi. Questo sistema di trasporto offrirebbe agli abitanti delle grandi città vantaggi di cui non dispone neppure ora chi guida la propria automobile.

La città e i suoi sobborghi sarebbero tra loro collegati in modo tale da offrire nuove possibilità di libertà e svago sia agli abitanti dei piú vecchi quartieri popolari, ora intrappolati nel caotico centro cittadino, sia alle donne di casa che, abitando nei quartieri satelliti, sono oggi schiave dell'automobile.

Si doveva inoltre considerare la possibilità che cosí drastiche modifiche ai sistemi di trasporto comportassero sostanziali cambiamenti al tessuto strutturale delle città. Dopo aver sperimentato talune variazioni di struttura, come la concentrazione degli abitanti in pochi densi nuclei, abbiamo ancora una volta constatato che il trasporto pubblico individuale offriva vantaggi indiscutibili.

Come si può confrontare dal punto di vista finanziario questo tipo di trasporto con le migliorie ai sistemi attuali? A Boston il costo di costruzione e di gestione di una rete a trasporto individuale sarebbe notevolmente piú oneroso per passeggero/chilometro di un trasporto rapido di tipo tradizionale, anche prevedendo di costruire ex novo una rete di metropolitana. Bisogna però ricordare che noi stiamo considerando una rete di trasporto individuale di 600 chilometri, mentre la metropolitana di Boston, compresa l'estensione prevista per il 1975, è di soli 100 chilometri. Ciò nonostante Boston e altre città, che hanno già in funzione un sistema considerevolmente esteso di trasporti rapidi su rotaie, dovrebbero attentamente valutare se esiste una reale convenienza a scartare i sistemi esistenti per sostituirli con il nuovo sistema, anche se quest'ultimo può offrire vantaggi non certamente raggiungibili con le metropolitane. Per la maggior parte delle nostre grandi città, invece, non ancora dotate di trasporti rapidi, il trasporto pubblico individuale può rappresentare una soluzione migliore della metropolitana. Per esempio a Houston, città orientata verso l'uso dell'automobile, il trasporto individuale, in base ai nostri calcoli, si è dimostrato molto piú economico oltre che piú efficiente, dei trasporti rapidi su rotaia. In città di questo tipo il trasporto pubblico individuale si presenta come un'operazione vantaggiosa.

Per città piú piccole come Tucson e New Haven il trasporto pubblico individuale sembra essere meno indicato. Data la loro limitata estensione e la bassa densità di popolazione (con conseguente minor uso del sistema) il costo passeggero/chilometro sarebbe circa tre volte superiore a quello di una grande città. È chiaro che sia il sistema di trasporto individuale sia quello di trasporti rapidi sarebbero troppo costosi per città con popolazione inferiore al mezzo milione di abitanti. Queste città d'altra parte, non hanno i problemi di congestione che assillano le grandi metropoli.

Concludendo, l'installazione di sistemi di trasporto pubblico individuale, eventualmente integrati da collegamenti del tipo «chiamata autobus» (le cui prestazioni non sono ancora prevedibili) e progettati sin dall'inizio in modo tale da prevedere l'eventuale aggiunta del servizio a doppio sistema, può essere ragionevolmente considerata utile nell'immediato futuro per molte città degli Stati Uniti. Noi crediamo che nei prossimi cinque anni potrebbe essere realizzato o collaudato un sistema di trasporto individuale di dimensione sufficientemente vasta e con un costo di circa 100 milioni di dollari. Spesa questa che non sembra eccessiva, se confrontata con i costi di qualsiasi metropolitana di considerevoli dimensioni. (Il sistema di trasporto rapido su rotaia proposto a Los Angeles, e respinto dal corpo elettorale, richiedeva un investimento di due miliardi e mezzo di dollari.)

Sulla base dei rapporti che l'HUD ha ricevuto dai gruppi incaricati di studiare il problema dei trasporti urbani, il Dipartimento ha sottoposto al Congresso un certo numero di proposte, evidenziando quelle relative al trasporto individuale, al trasporto con doppio sistema e alla chiamata autobus. Qualora i finanziamenti per la loro realizzazione fossero immediatamente disponibili, essi potrebbero entrare in funzione nelle città entro cinque anni.

Il nostro studio ci ha convinti che non c'è tempo da perdere per dare inizio a queste realizzazioni.

L'energetica del volo negli uccelli

Le ricerche sul metabolismo dei gabbiani e dei parrocchetti, durante il volo ascendente, discendente e orizzontale in un tunnel aereo, mostrano come gli uccelli in volo amministrano il proprio carburante

di Vance A. Tucker

È possibile misurare il lavoro eseguito dagli uccelli durante il volo? La loro velocità e resistenza hanno sempre sfidato la curiosità degli studiosi di fisiologia animale. Anche gli uccelli piú piccoli non solo rimangono in aria per ore, ma viaggiano « senza scalo » per centinaia o addirittura migliaia di chilometri a velocità appena raggiunte dai piú rapidi animali terrestri. Nel mio laboratorio presso la Duke University ho misurato il lavoro compiuto dai pappagallini ondulati (o parrocchetti) e dai gabbiani piombini a varie velocità e in diverse posizioni facendoli volare in un tunnel aerodinamico. Questo tipo di esperimento non era mai stato eseguito finora.

La velocità e la durata che rendono il volo degli uccelli tanto interessante rendono anche difficile la misurazione del bilancio energetico del volo. Sono stati usati molti metodi per valutare il consumo di energie del volo libero o librato, compresi i calcoli aerodinamici, la misurazione della perdita di peso durante il volo, il tasso di eliminazione dei composti radioattivi e il consumo di ossigeno. Quest'ultimo metodo è piú accurato degli altri citati, che si basano su presupposti piú o meno vaghi. Tutte queste tecniche comunque hanno un difetto comune quando vengono applicate a uccelli che volino liberamente: esse non permettono la manipolazione sperimentale della velocità, della durata e della direzione del volo in modo da poter rapportare tali fattori a delle misurazioni metaboliche.

Per questo motivo abbiamo adottato il metodo del tunnel aerodinamico. Un pappagallino o un gabbiano vengono posti nella camera sperimentale del tunnel e fatti volare entro una corrente d'aria a velocità regolabile (*si veda l'illustrazione a destra*). In questo modo l'animale può venir fatto volare alla stessa velocità che ha nel volo naturale, rimanendo tuttavia stazionario dal punto di vista dell'osservatore. Il volo di un uccello nel tunnel aerodinamico può essere paragonato al percorso di una barca a vela che punti contro una forte marea; sebbene l'acqua si muova rapidamente lungo lo scafo della barca a un osservatore sulla costa la barca può sembrare ferma. Lo sperimentatore può stabilire la velocità, la durata e la direzione del volo.

Per simulare il volo ascendente il tunnel viene inclinato in modo che la parte anteriore sia diretta verso l'alto. Un'inclinazione verso il basso crea le condizioni del volo discendente. Teoricamente le forze aerodinamiche e gravitazionali di un oggetto stazionario in un tunnel aerodinamico sono esattamente le stesse di quelle che si avrebbero se l'oggetto si muovesse nell'aria calma. È in questo senso che io mi riferisco a un uccello che voli in ascesa o in discesa quando il tunnel viene inclinato, anche se l'effettiva posizione dell'animale non cambia.

Durante il volo, l'uccello è munito di una maschera di plastica trasparente per raccogliere i gas espirati. Un elastico attorno alla parte posteriore del capo dell'animale mantiene la maschera in posizione, ed una pompa a vuoto convoglia i gas, mediante un tubo flessibile di plastica, verso gli strumenti per l'analisi in modo da misurare l'energia ricavata dai grassi e dai carboidrati.

Il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica vengono determinati misurando la concentrazione di questi gas nell'aria che entra ed esce dalla maschera e controllando il flusso dell'aria stessa attraverso la maschera. Oltre a convogliare i gas agli analizzatori il sistema della pompa a vuoto immette aria fresca dalla parte posteriore della maschera.

Il pappagallino ondulato venne scelto per gli esperimenti perché docile, facilmente procurabile nei negozi di animali e buon volatore. (Un precedente tentativo con un passero fallí perché l'animale invece di volare in linea orizzontale tentò di fuggire compiendo delle picchiate e delle giravolte nel tunnel aerodinamico). Un uccello piccolo come il pappagallino ondulato che pesa dai trenta ai quaranta grammi era il solo che potesse venir sistemato nel tunnel a disposizione in quel momento, una costruzione lunga m. 2,70 con una camera sperimentale piuttosto esigua. Quando cercai di studiare uccelli di maggiore dimensione scelsi il gabbiano piombino che pesa dai 300 ai 400 grammi; per caso uno dei miei colleghi aveva sottomano un certo numero di gabbiani per un altro esperimento. Per sistemare i gabbiani mi feci costruire un tunnel piú grande.

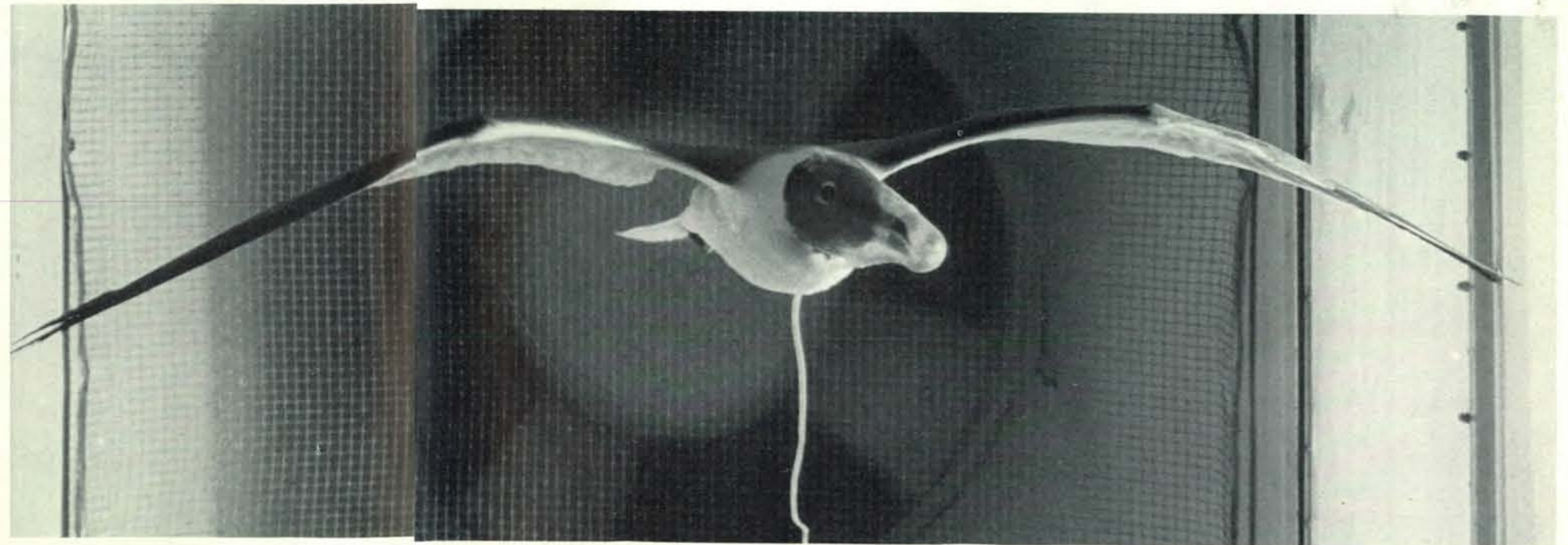
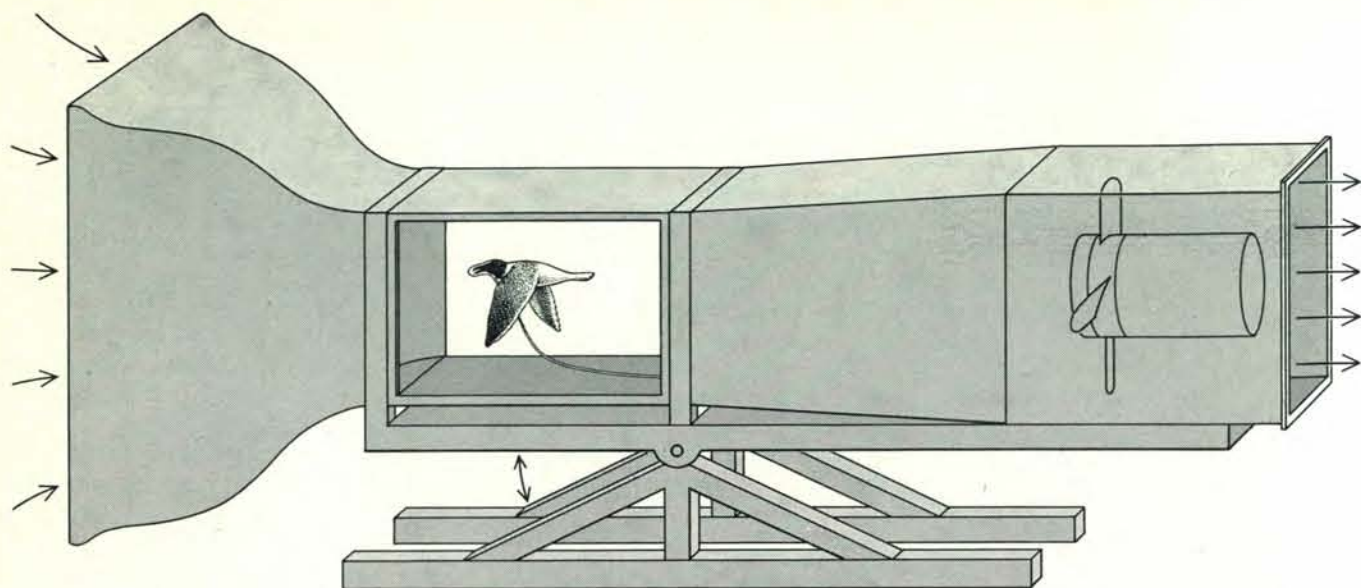
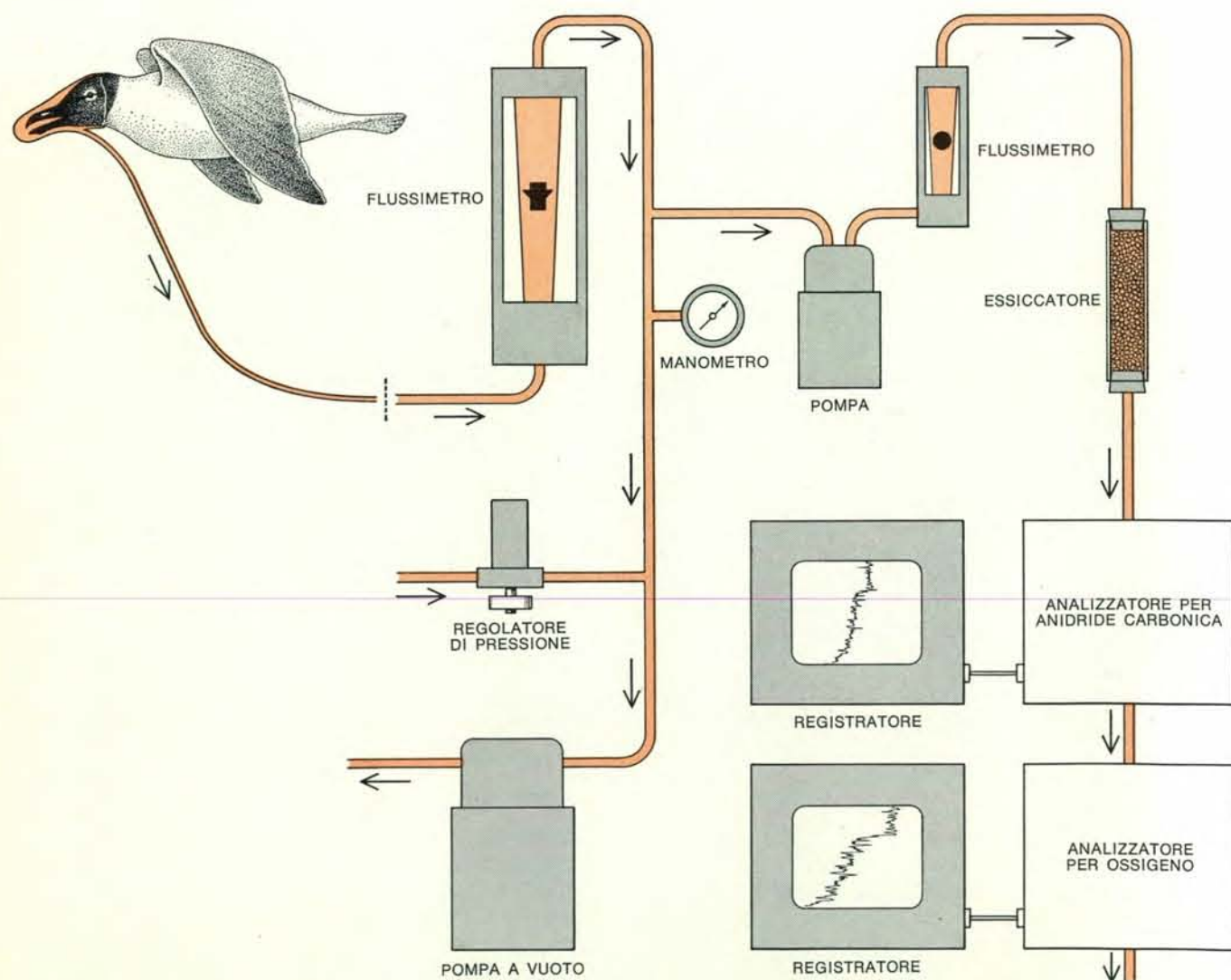
Insegnare agli uccelli a volare in un tunnel aerodinamico è abbastanza complicato. La mia tecnica consiste semplicemente nel punire lievemente l'animale se non vola e ricompensarlo quando lo fa. La punizione è costituita da una scossa elettrica (avvertibile da un uomo, ma non dolorosa) somministrata quando l'uccello si posa sul pavimento del tunnel. La ricompensa consiste nell'offerta di un posatoio su cui l'uccello possa riposare dopo un volo soddisfacente. Man mano che l'uccello impara a controllare i propri movimenti nei limiti della camera sperimentale esso diviene capace di volare per periodi sempre piú lunghi prima di rischiare una scossa elettrica. Di fatto, i gabbiani possono essere indotti a volare nel tunnel senza ricorrere allo shock elettrico; basta stimolarli con un bastoncino. Dopo parecchie settimane di addestramento sia i pappagallini sia i gabbiani raggiunsero una discreta resistenza anche indossando la maschera. Essi furono in grado di volare senza fermarsi per un periodo almeno due volte maggiore di quello considerato tipico per gli esperimenti (mezz'ora). Un gabbiano reale remigò e planò quasi ininterrottamente nel tunnel per dieci ore!

Una volta addestrati, sia i pappagallini sia i gabbiani si divertivano a volare, nel senso che volavano spontaneamente non appena il tunnel veniva fatto funzionare. Durante il periodo di addestramento però, i pappagallini intelligentemente delusero l'osservatore. Uno di essi evitò sia di volare che di essere raggiunto dalla scossa elettrica attaccandosi a tutte le sporgenze della camera sperimentale. Quando queste vennero identificate ed eliminate il pappagallino finí con l'imparare a stare sulla grata elettrica del fondo con una zampa sola evitando cosí di chiudere il circuito. Un altro ottenne il medesimo risultato appoggiandosi sul pavimento con la schiena e tenendo le zampe per aria. Quando finalmente gli animali impararono a volare correttamente nel tunnel, furono addestrati a indossare anche la maschera trasparente.

Sia nel tunnel aerodinamico come nel volo naturale gabbiani e pappagallini, come del resto gli altri animali ricavano l'energia per un lavoro tanto faticoso dalle reazioni che combinano l'ossigeno dell'aria con i grassi, i carboidrati e le proteine per produrre anidride carbonica, scorie azotate, acqua ed energia utilizzabile. Tra queste sorgenti energetiche, secondo quanto hanno concluso molti ricercatori, prevalgono i grassi, anche quantitativamente.

A parità di peso i grassi contengono pressappoco la stessa quantità di energia della benzina, piú del doppio di quella delle proteine e otto volte quella immagazzinata nei carboidrati.

Le mie ricerche confermano che il grasso è la piú importante fonte di energia per il volo degli uccelli. Bruciati in un calorimetro, i grassi forniscono 0,7 millilitri di anidride carbonica e 4,7 calorie per ogni millilitro di ossigeno consumato. Gli uccelli durante l'esperimento misero in evidenza quasi esattamente la stessa percentuale di scambio: il rapporto tra anidride carbonica espirata e ossigeno consumato dai pappagallini ondulati e dai gabbiani fu sempre di 1:0,7 - 1:0,8. Generalmente gli animali non usano le proteine come carburante e se gli uccelli avessero metabolizzato i carboidrati, avrebbero consumato e prodotto quantità uguali di ossigeno e anidride carbonica. Si può calcolare che piú del 70 per cento dell'energia impiegata nel volo fu ricavata dal metabolismo dei grassi e che vengano liberate 4,8 calorie per ogni millilitro di ossigeno consumato. Questo quoziente del consumo di ossigeno offre un metodo conveniente per determinare la potenza esplicata nel volo a diverse velocità e a diverse inclinazioni.

Gli esperimenti nel tunnel aerodinamico dimostrano come non sia semplice determinare il lavoro compiuto da un uccello durante il volo. Il dispendio di energie di un pappagallino ondulato dipendeva molto chiaramente dalla velocità di volo e dall'angolazione, in discesa o ascesa dello stesso. Per esempio, in volo orizzontale un pappagallino che viaggi a circa diciannove chilometri all'ora consuma energia ad un ritmo di 152 calorie per grammo-ora (si calcolano cioè le calorie necessarie per muovere ciascun grammo di peso corporeo ad una determinata velocità per il periodo di un'ora). Quando la

Gabbiano piombino che vola nella camera sperimentale di un tunnel aerodinamico indossando una maschera che raccoglie i gas espirati. Una pompa convoglia questi gas agli analizzatori che misurano la percentuale dei grassi e dei carboidrati metabolizzati dal gabbiano. Poiché l'animale vola « entro » la corrente d'aria, sembra immobile.

Il tunnel dell'autore può contenere un gabbiano piombino o altri uccelli di grandi dimensioni. La struttura, lunga m 7,50, può essere inclinata di 8 gradi per simulare il volo ascendente o discendente. Nel tunnel si possono raggiungere velocità di oltre 64 km/h.

L'impianto d'analisi misura i quozienti di scambio tra anidride carbonica e ossigeno nel volo ascendente, discendente e orizzontale entro il tunnel aerodinamico. Il costo energetico dei diversi tipi di volo può essere calcolato da questi valori numerici. Una pompa a vuoto raccoglie i gas dalla maschera mentre una pompa più piccola preleva regolarmente dei campioni da analizzare.

velocità dell'animale arriva a 35 chilometri all'ora il suo consumo di energia cala sino a un minimo di 105 calorie per grammo-ora. A velocità maggiori il consumo di energia aumenta raggiungendo un massimo di 165 calorie per grammo-ora sui 48 km/h.

Quando un pappagallino ondulato si innalza con un'angolazione di cinque gradi, il suo consumo energetico è di 140 calorie per grammo-ora a 24 chilometri orari e aumenta lentamente con l'aumentare della velocità sino a un massimo di 170 calorie per grammo-ora a 45 chilometri all'ora. Quando l'animale discende con un angolo di cinque gradi, invece, il suo dispendio di energia cala precipitosamente man mano che la velocità aumenta da 19 a 35 chilometri all'ora.

Nel valutare le prestazioni dei gabbiani bisogna notare che gli animali erano, sotto certi aspetti, notevolmente impacciati dalla maschera. La velocità massima nel volo sostenuto (45 chilometri all'ora) aumentava quasi del 15 per cento se veniva eliminata la maschera. Inoltre, il gabbiano munito di maschera volava generalmente con il becco aperto cosa che raramente fanno i gabbiani in libertà. Ciò potrebbe significare che l'animale lavorava in modo insolitamente faticoso oppure che la maschera provocava l'ansimare perché interferiva col flusso d'aria che normalmente raffredda il becco.

Ciononostante, i risultati nel tunnel aerodinamico sono simili alle prestazioni degli uccelli nell'ambiente naturale. Le oscillazioni di velocità entro cui il gabbiano volava piú economicamente nel tunnel (30 chilometri all'ora per la durata e 45 chilometri all'ora per la distanza) erano circa le stesse delle normali oscillazioni di velocità dei gabbiani in volo libero. I gabbiani piombini sono stati seguiti a una velocità di 30,4 chilometri all'ora col sistema del doppio teodolite. Il controllo radar della gavina americana e del gabbiano reale diedero rispettivamente le velocità di 37 e 40 chilometri all'ora. Va anche notato che i gabbiani non volano in ascesa, nel tunnel, per piú di qualche minuto mentre tale comportamento non è insolito in libertà dove i gabbiani preferiscono guadagnar quota veleggiando piuttosto che muovendo attivamente le ali.

Nel volo orizzontale il dispendio energetico del gabbiano piombino, al contrario di quello del pappagallino, rimane piuttosto costante, tra le 50-60 calorie per grammo-ora sia che l'animale voli a 24 o a 46 chilometri all'ora. Entrambe le specie possono consumare energia allo stesso valore multiplo del metabolismo basale, o di riposo. Questo multiplo è un valore numerico che va da 13 a 20 per il pappagallino e da 11 a 14 per il gabbiano. Alcuni mammiferi possono fare altrettanto ma solo per un breve periodo di tempo. Per esempio un uomo ben allenato (un atleta) può avere un consumo energetico da 15 a 20 volte superiore a quello basale, ma solo per pochi minuti.

Il consumo di energia nel tunnel aerodinamico è ovviamente in rapporto alla velocità e all'angolo di volo. Questo fatto suggerisce l'ipotesi che un uccello nel suo ambiente naturale possa risparmiare energia volando in modo da spendere una minima parte delle sue risorse metaboliche. È interessante prendere in considerazione le diverse esigenze di volo cui un uccello può andare incontro e vedere come l'animale reagisce con il minor dispendio di energie. Un uccello potrebbe, per esempio, aver bisogno di rimanere in aria il piú a lungo possibile, come nel caso di un gabbiano in cerca di cibo sull'acqua. In questo caso l'uccello può mantenere un'altezza di volo

Per applicare una maschera a un gabbiano lo sperimentatore aspetta il momento opportuno in cui l'animale rimane con il capo immobile e gli fa quindi scivolare la maschera sul becco. Un semplice elastico blocca poi la maschera al capo dell'uccello.

Un gabbiano con maschera può volare a una velocità costante massima di 45 chilometri orari. Senza maschera l'animale può aumentare la propria velocità sino a 50 km/h.

costante volando a una velocità alla quale le richieste energetiche sono minime. Questa velocità è di 30 chilometri all'ora per il gabbiano e di 35 chilometri all'ora per il pappagallino ondulato. A queste velocità il pappagallino consuma metabolizzando i grassi l'1,1 per cento del suo peso corporeo come carburante ogni ora, mentre il gabbiano consuma invece la metà di questo valore. Poiché alcuni uccelli sono in grado di immagazzinare grasso sino a quando questo costituisce la metà del loro peso corporeo, essi dovrebbero avere carburante sufficiente per compiere dei voli senza scalo di decine di ore. La loro resistenza precisa, tuttavia, è difficile da valutare perché non tutto il grasso è disponibile come carburante. Inoltre le richieste energetiche del volo probabilmente diminuiscono man mano che l'uccello consuma la sua scorta di carburante e diviene cosí piú leggero.

Un uccello migratore come il pappagallino ondulato potrebbe anche aver bisogno di coprire la massima distanza possibile con una determinata quantità di carburante. Questo potrebbe venire realizzato alla velocità alla quale il rapporto tra consumo energetico e velocità di volo sia minimo. I pappagallini ondulati viaggiano al massimo di economia tra i 35 e i 42 chilometri orari, velocità alle quali essi consumano lo 0,05 per cento del loro peso corporeo in grasso per ogni miglio percorso (equivalente a chilometri 1,6). Il gabbiano piombino viaggia alla massima economia sui 45 chilometri orari e consuma soltanto lo 0,024 per cento del suo peso corporeo in grasso per ogni miglio percorso. Questi dati confermano il fatto che alcuni uccelli possono volare per oltre 3600 chilometri senza nutrirsi. Infatti, il piviere dorato americano migra per oltre 3800 chilometri senza cibo dall'Alaska alle isole Hawai, e altri uccelli terrestri volano, sempre senza nutrirsi, dagli Stati nord-orientali sino alle Bermude, e dall'Africa attraverso il Sahara e il Mediterraneo sino a raggiungere l'Europa.

Diagramma del dispendio energetico del volo dei pappagallini ondulati e dei gabbiani. Le curve ripide rappresentano la spesa energetica di un pappagallino nei tre tipi di volo. Il gabbiano ci fornisce solo una curva per il volo rettilineo (*in colore*) perché nel tunnel non vola in ascesa e nel volo discendente si comporta cosí irregolarmente da non fornire dati attendibili. In volo pappagallini e gabbiani consumano energia dalle undici alle venti volte superiore a quella che metabolizzano a riposo.

Non sorprende il fatto che sia il pappagallino ondulato sia il gabbiano piombino abbiano circa la stessa velocità di massima resistenza e portata nonostante il primo pesi dieci volte di meno. Allo stato libero entrambi sono soggetti alle variazioni locali del vento di cui devono superare la velocità ordinaria se vogliono raggiungere la loro destinazione anche quando esso è contrario.

Infatti la velocità di volo di quasi tutti gli uccelli migratori, grandi o piccoli che siano, è superiore ai 30 km/h.

Gli uccelli possono anche risparmiare energia durante il volo ascendente o discendente adottando la velocità alla quale il rapporto tra la variazione di quota e la spesa energetica sia piú alto. Per determinare questo valore per i pappagallini ondulati mi sono servito dei dati degli esperimenti in cui il tunnel aerodinamico veniva inclinato di 5 gradi per simulare le condizioni del volo ascendente o discendente. La variazione di quota fu calcolata moltiplicando la velocità di ciascun uccello per 0,087; questa cifra corrisponde all'effettiva variazione di altezza per ogni piede di cammino percorso (1 piede equivale a 33 cm). Infine questi dati vennero confrontati con i rilevamenti del consumo energetico di ciascun animale durante il volo. Sono venuto cosí alla conclusione che sia il volo ascendente sia quello discendente risultano piú economici alla velocità alla quale i pappagallini ondulati raggiungono la massima portata: 41 chilometri orari.

Fino ad ora ho discusso l'economia del volo negli uccelli ma non il suo rendimento. Mentre l'economia di volo considera il costo del carburante per volare per diversi periodi di tempo e su differenti distanze, il rendimento misura la relazione tra il dispendio energetico e la sua resa. Nel caso di una macchina esprime la potenza sviluppata dalla macchina stessa come percentuale della potenza impiegata. Essa ci mostra cioè quanta dell'energia introdotta nella macchina si trasforma in lavoro utile. Si possono calcolare vari tipi di rendimento, compreso il rapporto tra potenza totale assorbita e potenza totale sviluppata. Nel caso del pappagallino ondulato però è importante considerare anche la relazione esistente tra le variazioni di potenza sviluppata che si verificano quando l'uccello si discosta dal volo orizzontale per salire o scendere e le conseguenti variazioni di energia richiesta. Questo metodo rende possibile paragonare il rendimento degli uccelli con quello di altri animali e conduce anche a una ipotesi che permette di spiegare perché alcuni uccelli « ondeggiano » in volo anziché seguire un percorso rettilineo.

La potenza sviluppata è il prodotto della velocità dell'animale per la forza di spinta che produce. L'uccello consuma anche energia per creare una forza di sostentamento (portanza), ma questa forza è praticamente costante anche quando il tunnel viene inclinato per simulare il volo ascendente e discendente. Perciò quando l'uccello si eleva dalla sua traiettoria orizzontale di volo a una data velocità, la sua potenza sviluppata aumenta rispetto alle condizioni precedenti unicamente per le variazioni di spinta e quando discende essa diminuisce per lo stesso motivo. Questi aumenti o diminuzioni della potenza sviluppata equivalgono esattamente alle variazioni di energia potenziale che si verificherebbero in seguito a effettivi cambiamenti di quota.

Una volta che i cambiamenti di potenza sviluppata sono stati determinati, i calcoli del rendimento possono venire completati servendosi degli aumenti o delle diminuzioni di consumo energetico misurati nella salita o nella discesa a una determinata velocità. Per un pappagallino che si innalza il rendimento è superiore al 50 per cento alla velocità minima di 19 chilometri orari. Scende quindi al 15-18 per cento man mano che la velocità raggiunge o supera i 28 chilometri orari. Il rendimento durante la discesa è piú costante, variando dal 14 al 24 per cento alle velocità oscillanti tra i 19 e i 48 chilometri orari. Ai 28 e ai 43 chilometri il rendimento è lo stesso, sia in salita che in discesa.

Poiché il rendimento nell'ascesa descrive il lavoro di un uccello per aumentare la spinta, esso è paragonabile a quello di altri animali che camminino lungo piani inclinati o trascinino dei pesi. Opportune misure in simili condizioni sono state fatte per l'uomo, il cane e il cavallo. Tutti posseggono una efficienza tra il 30 e il 35 per cento (cioè, l'energia sviluppata equivale al 30-35 per cento dell'energia assorbita). Il pappagallino ondulato nella maggior parte della sua gamma di velocità di volo ha un rendimento che equivale a circa la metà di quello di questi animali, ma è molto piú efficiente alle minime velocità.

Un alto rendimento per aumentare la spinta a bassa velocità si spiega col fatto che nell'ambiente naturale i pappagallini ondulati si cibano spesso sul terreno. Poiché un pappagallino deve prender quota da terra deve contemporaneamente accelerare e innalzarsi. (Se dovesse prendere il volo da un albero gli basterebbe accelerare.) Grazie alla efficienza con cui l'uccello utilizza l'energia a bassa velocità esso può sollevarsi e raggiungere la velocità di crociera a un costo energetico che è di poco superiore a quello necessario per un lento volo senza cambiamenti di quota.

Il lettore a questo punto non deve trarre la conclusione che un uccello guadagni quota col massimo di economia a velocità ridotta. Ho già ricordato che la migliore velocità di ascesa è di 41 chilometri orari. Il volo lento per il pappagallino è un processo costoso, ma sin tanto che l'uccello è costretto a volare lentamente può anche guadagnar quota. Il costo supplementare è poca cosa. A velocità superiori ai 28 chilometri orari il rendimento durante l'ascesa è diminuito, ma è anche diminuito il costo totale del volo. Come risultato l'uccello guadagna quota con crescente economia man mano che si avvicina alla velocità ottimale di ascesa e di crociera di 41 chilometri orari.

Questi studi sul rendimento nei pappagallini ondulati suggeriscono l'idea che il volo ondulato di alcuni fringuelli e dei picchi, come anche il volo lievemente oscillante degli uccelli migratori (che possono scendere e salire anche di 6 chilometri durante i viaggi di lunga durata) possa rappresentare uno stratagemma per risparmiare energia. Quando l'efficienza del volo ascendente e discendente è la stessa a una data velocità, come lo è per i pappagallini ondulati a 28 e poi ancora a 43 chilometri orari, il dispendio energetico supplementare durante l'ascesa è uguale al risparmio ottenuto durante la discesa. In questo modo l'uccello potrebbe salire ad una data altezza e discendere senza variazioni di costo rispetto al volo rettilineo per lo stesso periodo di tempo.

Ne consegue che se il rendimento durante l'ascesa è maggiore di quello durante la discesa, l'uccello può di fatto risparmiare energia nel volo variamente ondulato. In realtà piú basso è il rendimento durante la discesa, maggiore è l'energia che l'animale risparmia. Poiché esso per il pappagallino ondulato è sempre minore del 25 per cento, si potrebbe arguire che se l'uccel-

Per simulare il volo ascendente si inclina il tunnel aerodinamico verso l'alto. Il pappagallino reagisce aumentando la propria forza di spinta mentre la portanza rimane quasi costante.

Simulazione del volo discendente nel tunnel. Quando il pappagallino « sale » o « scende » le forze aerodinamiche e di gravità sono identiche a quelle che si verificano in natura.

lo potesse salire (vale a dire aumentare la sua spinta) a velocità di crociera con rendimenti del 30-35 per cento, come quelli cioè del cane, del cavallo e dell'uomo esso potrebbe risparmiare energia compiendo varie picchiate. In libertà però il pappagallino vola in linea retta perché in effetti il rendimento durante l'ascesa è minore di quello durante la discesa alle velocità tra i 28 e i 43 chilometri orari.

Come regge il confronto il volo degli uccelli, in quanto forma di locomozione, con il camminare, il correre o il volo di un aereo? Due termini di confronto sono la velocità e la resistenza. Sotto questo aspetto gli uccelli sono decisamente superiori agli animali terrestri. Persino gli uccelli piú piccoli volano per ore a velocità superiori ai 32 chilometri orari e gli uccelli piú grandi, quali per esempio le anitre, possono raggiungere velocità di crociera tra i 64 e gli 80 chilometri orari. Soltanto pochi grossi animali terrestri come le antilopi, lo struzzo e il ghepardo possono arrivare a tali alte velocità, ma nessuno di loro può mantenerle a lungo. Ho ricordato che alcuni uccelli sono capaci di volare senza prendere cibo per decine di ore e per migliaia di chilometri. Nessun animale camminatore o corridore può uguagliare queste prestazioni che in termini di resistenza sono rispettabili anche per un aeroplano.

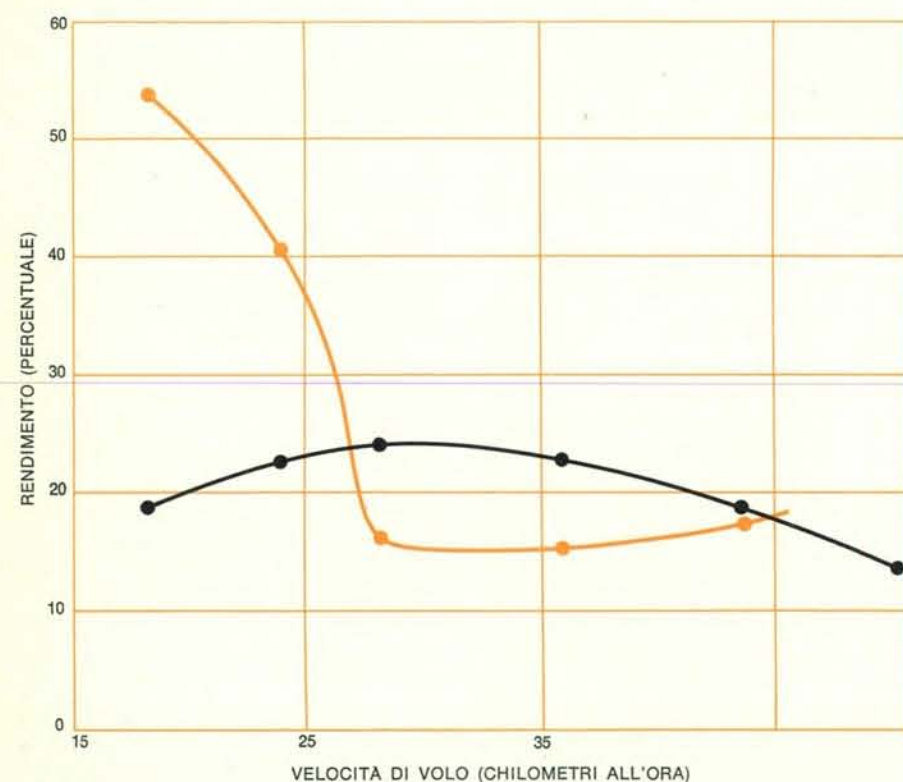
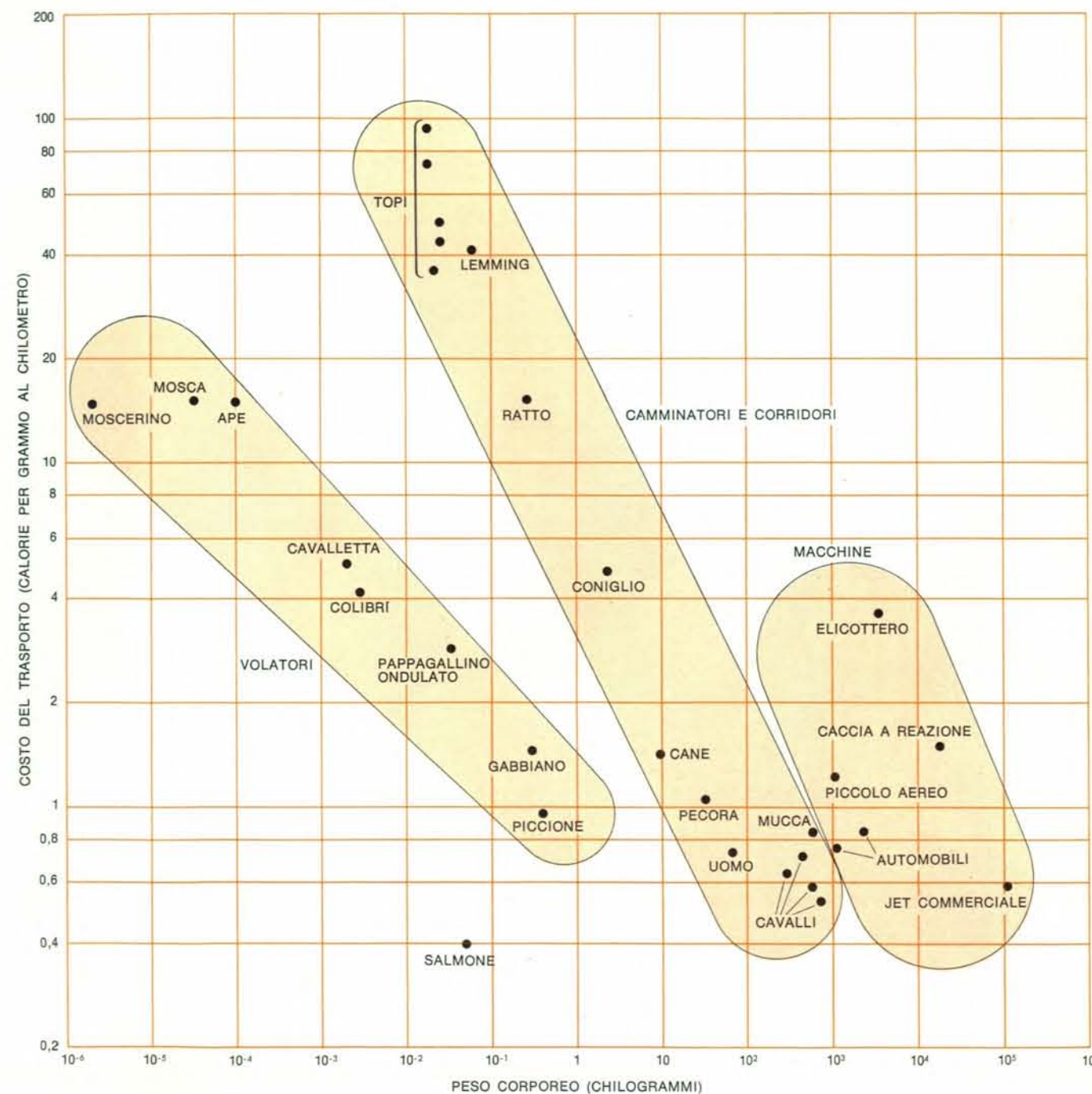
Un altro punto di paragone è il costo energetico di trasporto, misurato in unità caloriche richieste per trasportare un grammo di peso corporeo per un chilometro. Queste unità hanno il vantaggio di indicare, qualunque siano le dimensioni dell'animale, il costo necessario per muovere una data massa su una data distanza. Per esempio, il costo di trasporto di un'ape in volo è circa lo stesso di quello di un topo che corre e che pesa tremila volte di piú. In questo modo quando trecento grammi vengono mossi per un chilometro sia sotto forma di uno sciame di 3000 api sia di un unico topo, il costo calorico è lo stesso.

Misurato in questo modo il costo di trasporto per vari animali che nuotino, camminino, corrano o volino generalmente diminuisce man mano che il peso corporeo aumenta. Un moscerino della frutta, per esempio, spende piú energia per muovere ogni unità del suo peso lungo un determinato percorso, di quanto non faccia una cavalletta (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Quando si confrontano tra loro animali che camminano, corrono o volano, quelli capaci di volare si dimostrano molto piú « economi » di quelli terrestri. Un mammifero camminatore o corridore spende da dieci a quindici volte piú energia per coprire una data distanza di quanto non faccia un uccello delle stesse dimensioni. Non fa quindi meraviglia che i piccoli mammiferi non intraprendano lunghe migrazioni stagionali! Alcuni uccelli possono viaggiare addirittura piú economicamente di alcune macchine. Un piccione per esempio vola con piú economia di un piccolo aereo e un'oca del Canadà può essere capace di comportarsi meglio di un jet da trasporto.

Sebbene gli esperimenti nel tunnel aerodinamico ci offrano delle interessanti informazioni circa il metabolismo e il volo, non bisogna dimenticare che tali esperimenti riproducono solo alcuni aspetti delle condizioni naturali del volo e mai la loro ricca varietà. In aggiunta, la sperimentazione introduce alcune condizioni non naturali. Benché le forze aerodinamiche nella camera sperimentale siano idealmente le stesse di quelle dell'aria calma, il flusso di aria nel tunnel è piú o meno turbolento, e le pareti della camera possono interferire col flusso dell'aria intorno all'uccello. L'effetto di queste distorsioni è difficilmente determinabile. Quantità relativamente piccole di turbolenza, per esempio, possono migliorare le prestazioni aerodinamiche di un volatile o delle ali di un modello di aereo, ma un'eccessiva turbolenza aumenta la spesa energetica di un pappagallino volante. Inoltre, un uccello che voli in un tunnel e che indossi una maschera ha un limitato spazio per manovrare e la sua forma, il suo peso e la distribuzione di quest'ultimo differiscono da quelli di un uccello che voli liberamente.

Anche se si potesse essere sicuri che un uccello che vola in un tunnel utilizza esattamente la stessa quantità di energia di un uccello che vola nell'aria calma vi è sempre un certo grado di incertezza in ogni valutazione del costo del volo nell'ambiente naturale. Ciò è soprattutto vero per i lunghi voli migratori. L'aria in cui un uccello vola in natura non è ferma, ma si muove in modo complesso. Essa si riscalda alla superficie del suolo, si innalza e viene sostituita da masse di aria discendente. Sovrapposte a queste correnti termiche vi sono le correnti dei venti che si muovono orizzontalmente sulle superfici piane, ma che sviluppano delle componenti verticali quando incontrano altri venti o caratteristiche del terreno quali alberi o rilievi orografici. Tali correnti sono abbastanza forti da influenzare il dispendio energetico degli uccelli in volo; poiché la maggior parte di essi vola a velocità che oscillano tra i 32 e i 78 chilometri orari, anche i normali venti possono modificare la loro velocità, rispetto al suolo, del 50 per cento.

Le correnti verticali possono essere sufficientemente forti per mantenere un uccello in aria, come è dimostrato dalle specie che volteggiano nelle correnti termiche, lungo i crinali o, in mare, sopra le navi. Anche in assenza di correnti verticali gli uccelli subiscono accelerazioni verso l'alto o verso il basso a causa dei cambiamenti sia della velocità che della direzione del vento. In particolare, l'albatros ha fama di rimanere in volo indefinitamente senza batter ala muovendosi attraverso i gradienti di velocità dei venti sul mare. Cambiamenti nella velocità orizzontale del vento sufficienti a influenzare il volo degli uccelli in questo modo, si rinvengono ovunque nelle giornate ventose. Essi si verificano con le raffiche di vento, a causa di caratteristiche topografiche quali gli alberi e al confine delle masse d'aria tra le superfici della terra e del mare.

In questa sede ho discusso soltanto dei problemi energetici del volo degli uccelli, ma mi sono servito del tunnel aerodinamico per studiare anche altri aspetti della fisiologia del volo: la meccanica respiratoria, il fabbisogno idrico e calorico, e le risposte alla simulazione delle grandi altezze. Inoltre il tunnel è utile per le ricerche aerodinamiche. A questo proposito i miei colleghi ed io abbiamo studiato sia il volo remigato che quello planato degli avvoltoi e dei falchi. Entro pochi anni speriamo di usare il nostro tunnel per compiere altre ricerche nel campo della biologia degli uccelli.

Il rendimento del volo varia per il pappagallino ondulato alle diverse velocità. A 28 e 43 km/h durante il volo ascendente (*curva colorata*) e discendente i rendimenti si equivalgono e quindi in quei punti il volo ondulatorio non costa di piú di quello rettilineo.

Il volo degli uccelli confrontato con gli altri tipi di locomozione animale si dimostra in genere molto piú economico del camminare o del correre. I volatori di grandi dimensioni possono infatti viaggiare per distanze maggiori, a parità di calorie per unità di peso, di un piccolo aereo o persino di un caccia a reazione. Le prestazioni di un giovane salmone mostrano tuttavia che un pesce può viaggiare ancora piú economicamente dei gabbiani, dei piccioni, dei cavalli e di qualsiasi altro animale.

Willis, « il dottore doppio », capo dei medici che trattarono il primo attacco di porfiria di Giorgio III, dirigeva un manicomio privato. Qui è mostrato in una caricatura di Thomas Rowlandson. Il soprannome dato a Willis derivava dal fatto che era dottore in medicina e in teologia. Il suo metodo di cura consisteva in severe restrizioni e coercizioni per ogni paziente folle. Qui due pazienti sono avvolti in « lenzuola attorcigliate ». L'uso di questo metodo, che comprendeva anche la camicia di forza, quando il re in delirio non seguiva i suoi ordini, fu la causa dell'inimicizia di Giorgio III verso tutti i medici.

Una crudele caricatura della famiglia reale pubblicata l'anno precedente il primo attacco subito dal re. Il lavoro, di James Gillray e intitolato « Mostruosi gozzi a una festa della nuova coalizione », venne ispirato dalla credenza popolare che gli « stranieri » Hannover sperperassero i fondi della nazione a loro proprio vantaggio. La regina (*a sinistra*), il principe di Galles (*al centro*) e il re (*a destra*) vengono rappresentati mentre siedono fuori della camera del Tesoro e si ingozzano d'oro. In effetti il re era frugale, ma il principe di Galles (in seguito nominato suo reggente) fu famoso per l'incontrollata prodigalità.

La porfiria e il re Giorgio III

Il monarca inglese al tempo della rivoluzione americana fu generalmente ritenuto folle, mentre alla luce delle moderne acquisizioni scientifiche sembra che egli soffrisse di una gravissima alterazione del metabolismo

di Ida Macalpine e Richard Hunter

Il Re Giorgio III, considerato su entrambe le sponde dell'Atlantico come il monarca inflessibile che le colonie americane combatterono per raggiungere l'indipendenza, non era un uomo sano. La sua apparente « follia » influenzò il corso della storia britannica e, fra l'altro, portò al riconoscimento della psichiatria (fino allora chiamata « l'affare dei matti ») come un'importante branca della medicina. È abbastanza strano che solo oggi a un secolo e mezzo dalla sua morte, si sia potuto stabilire che Giorgio III non era affatto pazzo. Questo re tanto diffamato soffrí di una malattia del metabolismo, solo recentemente riconosciuta come tale, molto dolorosa e con accessi di delirio.

Mentre stavamo occupandoci di una storia della psichiatria, abbiamo scoperto con notevole interesse quanto grande fu l'influenza che ebbero i preoccupanti attacchi di follia di Giorgio III sulle origini e lo sviluppo di questa scienza tanto che decidemmo di cercare di scoprire il piú possibile sulla malattia stessa. Fortunatamente potemmo trovare le carte e gli appunti dei medici che a quel tempo esaminarono il re, conservati in parte nel Castello di Windsor, altri nel British Museum e nella biblioteca del Lambeth Palace e altri ancora dai discendenti stessi del sovrano; inoltre ci fu molto utile la corrispondenza, di recente pubblicata, di Giorgio III. Le descrizioni da parte dei medici della malattia del re (non precedentemente esaminate negli ultimi tempi) insieme ad altre prove evidenti, ci consentirono di fare una sicura diagnosi della malattia stessa alla luce delle attuali conoscenze mediche.

Cominciamo con un resoconto storico della sua malattia cosí come è riportato nei documenti del tempo. Il primo attacco grave avvenne nel 1788, quando il re aveva 50 anni. Nel giugno di quell'anno il re aveva sofferto di un acuto dolore addominale; il suo medico curante, Sir George Baker, ne diagnosticò la causa in calcoli della cistifellea e lo mandò a Cheltenham Spa per una cura idropinica. L'episodio si attenuò ma in ottobre riapparvero i dolori, accompagnati da costipazione, urine torbide e scure, debolezza muscolare degli arti, vertigini e polso rapido. Nelle settimane successive il re soffrí di insonnia, cefalea, disturbi visivi e di una crescente agitazione; a partire dalla terza settimana cadde in delirio e verso l'otto-nove novembre ebbe convulsioni seguite da un prolungato stato di incoscienza. I medici temettero una febbre « cerebrale » e che il re fosse in imminente pericolo. In effetti, per una settimana sembrò oscillare tra la vita e la morte, dopodiché le sue condizioni fisiche cominciarono a migliorare ma la sua mente rimase « disturbata ». Vi furono periodi di grande eccitamento, seguiti da momenti di lucidità e di calma.

« Idee storte » si impossessarono del re e i suoi medici trovarono sempre piú difficile curarlo.

Durante tutto questo tempo, sebbene assistito da una moltitudine di medici, il paziente non fu realmente visitato nel significato attuale della parola. I dottori gli guardavano la lingua, gli sentivano il polso, si informavano sulle funzioni escretorie, ne ascoltavano le lamentele e tentavano di pronunciare una diagnosi « basandosi sulla stima dei sintomi e delle apparenze ». Infatti a quell'epoca non vi erano strumenti, non esisteva lo stetoscopio, non c'era nemmeno un termometro clinico sicuro per misurare la temperatura; inoltre i medici erano spesso in disaccordo sulla velocità del polso perché presumibilmente si basavano sul battito delle pendole che non sempre erano esatte; non ascoltavano il torace e se anche l'avessero fatto non ne avrebbero ricavato sintomi utili.

Per di piú erano ostacolati dall'etichetta di corte che non permetteva di porre domande dirette al re sui sintomi della malattia a meno che lui stesso non ne parlasse per primo. (Dopo una sessione di infruttuoso silenzio i medici deploravano: « Sua Maestà appare molto tranquillo stamattina ma non avendoci rivolto parola noi non sappiamo nulla di piú sulle condizioni mentali o fisiche di Sua Maestà di quello che appare dal suo aspetto esteriore ».)

In contrasto con l'oscurità e l'indeterminatezza dei sintomi fisici dello stato di salute del re, quelli mentali risultavano molto evidenti e chiari; i medici non avevano bisogno di mezzi moderni per rilevare che il suo comportamento era eccitato e irrazionale e la sua mente confusa. Inoltre, il suo stato mentale provocava molte preoccupazioni circa la sua capacità di governare e circa i pericoli che potevano derivarne per la nazione e l'impero, perciò le sofferenze fisiche del sovrano furono minimizzate (e in seguito misconosciute), mentre l'alterazione mentale veniva maggiormente considerata come se essa sola costituisse tutta la malattia. Furono chiamati medici specializzati in « malattie intellettuali » che si stabilirono a palazzo assumendosi la responsabilità della camera dell'ammalato.

Uno di questi era il Rev. Dr. Francis Willis, chiamato « dottore doppio » perché era dottore sia in medicina che in teologia. Il Dr. Willis, direttore di un manicomio, arrivò al Kew Palace

Urina color vino (nella seconda provetta), eliminata durante un attacco acuto di porfiria. Per confronto, a sinistra, urina normale e, a destra, vino Porto. Giacomo I, sofferente di porfiria, diceva che la sua urina aveva il colore del Porto.

con gli assistenti e gli strumenti della sua casa di cura, compresi gli inservienti e una camicia di forza. Egli applicò al re il trattamento abitualmente riservato ai matti: coercizione e restrizioni. Al re veniva messa la camicia di forza per aver infranto la disciplina, per esempio, per essersi tolto arbitrariamente la cravatta e la parrucca che gli davano fastidio quando era soggetto a un'abbondante sudorazione, o per aver rifiutato di mangiare quando faceva fatica a inghiottire, o per aver camminato avanti e indietro nella stanza quando era troppo agitato per restare sdraiato. Lo strano e imprevedibile comportamento del re veniva attribuito all'acme della mania furiosa e il suo fiero (e comprensibile) disprezzo verso i dottori e guardiani veniva attribuito a fissazioni.

La sua malattia fomentò una storica contesa parlamentare nota come la « crisi della reggenza ». I Whigs (liberali), con a capo Charles James Fox, Edmund Burke e Richard Brinsley Sheridan (celebre drammaturgo oltre che membro del Parlamento), tentarono di provocare le dimissioni del primo ministro del re, William Pitt, e degli altri membri del suo gabinetto. Per quattro mesi il Parlamento si interessò esclusivamente della malattia del re e delle controversie che la stessa causava. Membri del Parlamento interrogavano senza sosta i medici curanti per stabilire se il re soffrisse solamente di un prolungato delirio da cui ci si poteva aspettare che egli guarisse con una mente inalterata, o fosse afflitto da « pazzia » che avrebbe oscurato permanentemente il suo giudizio.

Proprio quando il Parlamento stava per approvare una legge relativa alla reggenza, la mente di Giorgio III improvvisamente ritornò normale. Alla fine del febbraio 1789 i medici annunciarono « la completa cessazione » della sua malattia. Sebbene Willis si attribuisse il merito della cura, è chiaro, osservando l'andamento della malattia, che la guarigione del re dovette essere spontanea e ciò avvenne tanto sollecitamente da permettergli di lasciare il confino al Kew Palace e ritornare al Castello di Windsor, sua residenza preferita. La sua guarigione fu celebrata in tutta la nazione con straordinarie manifestazioni di giubilo.

Nel 1801 e nel 1804 Giorgio III soffrí di ricadute della stessa malattia; molto gravi all'inizio, con gli stessi identici sintomi fisici e disturbi mentali di breve durata. Infine, nel 1810, la malattia si aggravò talmente da rendere necessaria la reggenza del Principe di Galles, a partire dal 1811. Per circa un anno si sperò che Giorgio III migliorasse nuovamente e suo figlio durante la reggenza non osò dimettere il gabinetto per evitare a Giorgio III una situazione penosa e imbarazzante nel caso gli fosse stato possibile risalire sul trono. La malattia del re ebbe temporanee remissioni, a cui purtroppo seguirono delle ricadute. Aveva oltrepassato i 70 anni, era divenuto cieco ed era molto peggiorato fisicamente e mentalmente a causa dei ripetuti attacchi della sua malattia. Durante gli ultimi anni di vita Giorgio III fu nel complesso tranquillo, suonava volentieri il clavicembalo e aveva periodi di buon umore e di allegria, tuttavia era spesso « imbronciato e assente », lacrime e riso si alternavano frequentemente e a volte era colpito dai vecchi accessi dolorosi. Un mese prima della morte, durante l'ultimo di questi attacchi, passò 58 ore agitatissime, senza sonno o riposo e « diede un'altra rimarchevole prova delle straordinarie energie della sua costituzione ». Morí quietamente il 29 gennaio 1820 all'età di 81 anni.

Dopo la sua morte, preconcetti politici e opinioni professionali diedero forma a una immagine di Giorgio III come un « re pazzo », piú o meno sconvolto dalla malattia durante tutta la vita. Il primo attacco lo ebbe nel 1765, all'età di 26 anni e venne ritenuto un primo sintomo di follia. Non vi era stato alcun evidente accenno che un disturbo mentale accompagnasse la prima malattia ma il popolo ritenne che il re doveva essere folle per permettere l'applicazione dell'infamante Legge del Bollo che diede l'avvio alla Guerra Americana di Indipendenza. Inoltre gli psichiatri, che piú tardi diagnosticarono la malattia di Giorgio III, adottarono l'interpretazione della follia per la malattia che colpí il re nel 1765 allo scopo di sostenere la loro teoria; non

PORFINA

EMINA

Il costituente fondamentale della porfirina, la molecola di porfina, è formata di quattro anelli pirrolici legati da ponti metinici. Tra i pigmenti formati da molecole di porfina vi sono tre elementi essenziali alla vita animale e vegetale: l'emoglobina, la clorofilla e il citocromo. A confronto una molecola di emina che differisce soprattutto per avere un atomo di cloro e uno di ferro attaccati agli anelli pirrolici.

avrebbe senso presumere che il re, se mentalmente instabile, avrebbe potuto sopportare i primi 28 anni del suo tempestoso regno senza manifestare alcun segno di alterazione psichica.

La grande importanza data alla supposta follia di Giorgio III ebbe grandissima eco nell'ambiente profano e medico e diede luogo ai primi sistematici tentativi di trattare la follia come un problema medico. William Black, un professore di medicina dell'epoca, che era in completo disaccordo coi goffi tentativi dei medici per cercare di prevedere l'epoca della guarigione del re, considerò il problema dal punto di vista statistico e cosí diventò il fondatore della statistica psichiatrica. Studiando i casi di persone che erano state dichiarate pazze, egli giunse alla conclusione, conclusione che potrebbe essere chiamata « legge di Black », che un terzo di tali pazienti può guarire recuperando integralmente le facoltà mentali, un terzo può migliorare senza recuperare le primitive capacità mentali, e un terzo non migliora del tutto o continua a peggiorare.

Richard Powell, un altro medico pure propenso a dar valore alle statistiche, trovò che negli anni immediatamente seguenti l'attacco subito dal re nel 1788 vi fu un grande aumento nel numero delle persone ricoverate nei manicomi privati. Presentò il risultato dei suoi studi graficamente con un istogramma, introducendo per la prima volta questo mezzo nella storia della medicina. Powell attribuiva l'apparente aumento della malattia mentale alle difficoltà sempre piú complesse della civilizzazione e la sua interpretazione sociale è ancora ampiamente chiamata in causa per spiegare l'aumento dei disturbi mentali.

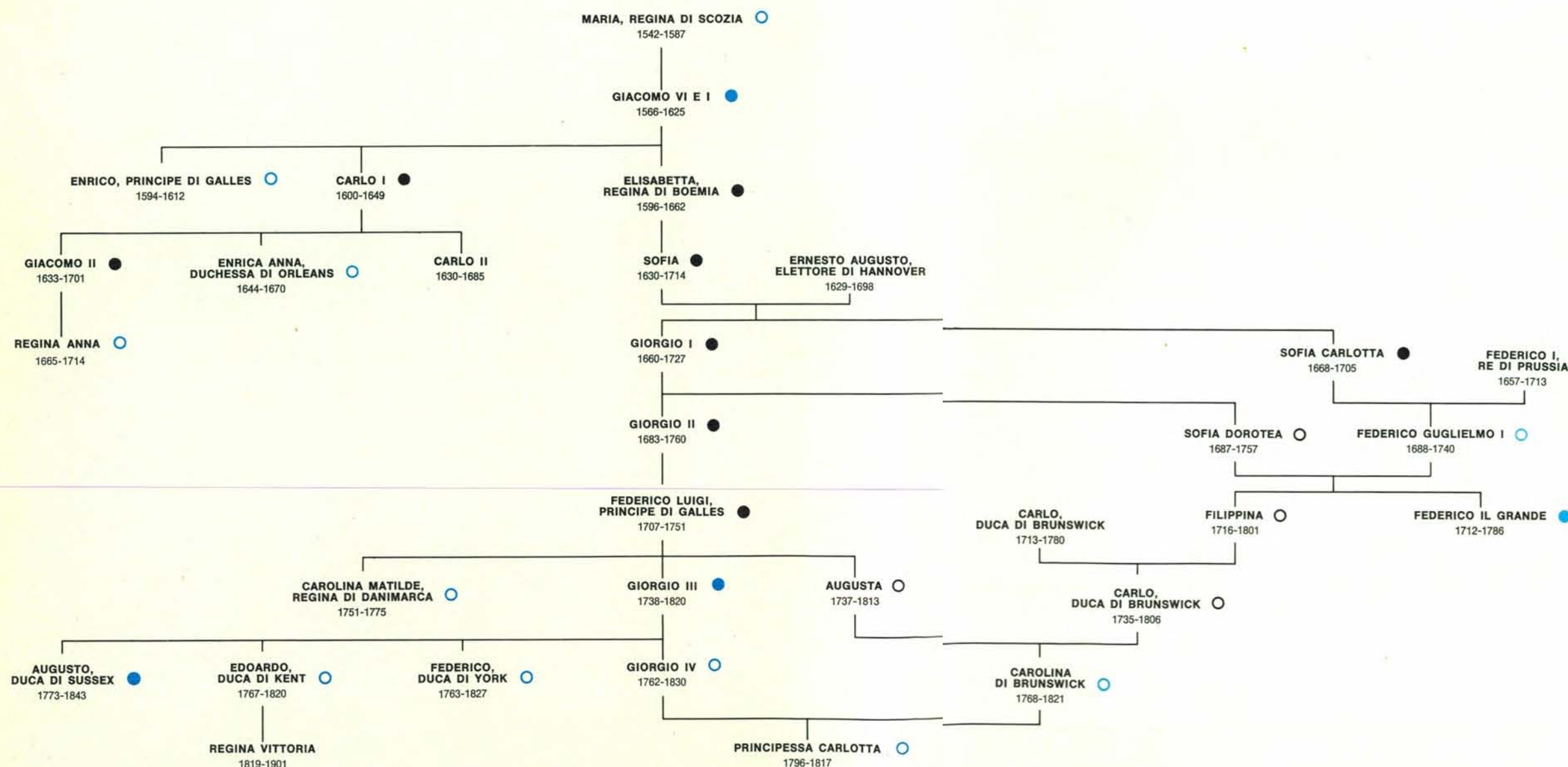
Due figli di Giorgio III, i duchi di Kent e di Sussex, istituirono il primo fondo per ricerche in psichiatria e patrocinarono il primo tentativo controllato per il trattamento della follia. Il tentativo fu condotto da due profani che avevano trovato un rimedio segreto e speravano fosse sperimentato sul re. Anche un medico londinese, Edward Sutleffe, offrí un rimedio che egli definiva « un tranquillante a base di erbe » introducendo cosí il termine usato oggi preminentemente per i farmaci adottati nella cura dei disturbi mentali.

Il Parlamento, sollecitato per la ricerca di una cura piú efficace per i malati di mente, e in particolare per quelli poveri (« i pazzi indigenti »), istituí un comitato che aveva lo scopo di condurre inchieste sui manicomi. Sotto la presidenza di un amico personale del re, George Rose, il comitato svolse indagini per due anni e pubblicò rapporti che prepararono il terreno alla cura dei malati mentali in asili specializzati che durarono fino al nostro secolo e la cui documentazione può ancora oggi venir consultata. Questa iniziativa ebbe alcune sfortunate conseguenze: i pazienti venivano isolati dalla società, spesso rinchiusi in lontane case di cura e si creò una separazione artificiale fra malattia mentale e malattia fisica, ognuna delle quali era seguita da propri specialisti. Purtroppo la psichiatria venne allontanata dalla medicina vera e propria e medici e psichiatri si separarono in due branche distinte.

Considerata l'importanza storica della malattia di Giorgio III, è strano che cosí scarsi siano stati i tentativi, sia da parte degli psichiatri sia dei medici, per appurare la reale natura della malattia del re e è incredibile che due soltanto siano stati gli studi medici condotti al riguardo. Entrambi furono fatti da psichiatri americani, circa un secolo piú tardi, e non tennero in alcun conto le difficoltà mediche del caso.

Nel 1855 Isaac Ray, presidente dell'Association of Medical Superintendents of American Institutions for the Insane (ribattezzata in seguito, American Psychiatric Association) esaminò le notizie a quell'epoca disponibili sulla malattia di Giorgio III e fu sorpreso dalla mancanza di precedenti che giustificassero gli attacchi di disordine mentale del re. Ray scriveva: « Pochi uomini sarebbero sembrati meno passibili di follia. Il suo stato di salute generale era sempre stato buono; le sue forze non erano indebolite da nessuno di quegli eccessi abitualmente riscontrabili nella vita dei sovrani; egli era quasi completamente astemio e faceva molti esercizi fisici all'aria aperta. Non si erano mai avuti casi di follia nella sua famiglia ed egli era del tutto esente da quelle stranezze e atteggiamenti stravaganti che caratterizzano una mente non equilibrata. » Tuttavia, sulla base dei rapporti che aveva potuto consultare, Ray diagnosticò la malattia di Giorgio III come « mania » (termine generico per malattia mentale come « febbre » lo è per un disturbo fisico). Il tentativo di Ray di giungere ad una diagnosi fu gravemente ostacolato dalla scarsità di dati sicuri sul caso e dallo stato relativamente primitivo delle conoscenze mediche del diciannovesimo secolo.

Nel 1941, l'eminente psichiatra Manfred S. Guttmacher, di Baltimora, riesaminò il caso di Giorgio III dal punto di vista della moderna psicoanalisi. È tipico del punto di vista psicoanalitico che, dato un caso di malattia mentale, si tengano in scarsa considerazione i sintomi fisici e le cause. Guttmacher non diede importanza ai disturbi fisici del re, attribuendoli in parte agli sforzi della corte di tener celata la follia del re e in parte all'immaginazione nevrotica del re stesso. Descrivendo la malattia in termini moderni come una psicosi maniacodepressiva, Guttmacher aggiunse: « Sottovalutazione di se stesso, indecisione e frustrazione distrussero l'equilibrio mentale di Giorgio III ... Individuo vulnerabile, quest'uomo instabile ... non poteva tollerare la sua timorosa incertezza [e] non resistette alla tensione. [Se il re fosse] stato un nobile di campagna, con ogni probabilità non sarebbe stato matto ». (In realtà il re era noto ai suoi sudditi come Giorgio il Contadino a causa della sua passione per l'agricoltura.)

Quando cominciammo il nostro studio particolareggiato sulla vita e le malattie di Giorgio III non trovammo basi che sostenessero questa interpretazione psicoanalitica del suo caso. I contemporanei di Giorgio e i primi biografi lo descrivevano come uno dei sovrani britannici piú attenti e informati; egli era musicista, collezionista di libri (la sua raccolta costituisce un'importante sezione del British Museum), mecenate delle arti e delle scienze, amante della vita di campagna e della sua famiglia. Se fosse stato mentalmente ed emotivamente instabile, come avrebbe potuto superare il disastroso pe-

I membri di tre case reali soffrirono di porfiria. La prima a esserne colpita fu Maria, regina di Scozia, una Stuart. Dai suoi discendenti la malattia si trasmise alle case di Hannover e di Prussia. I cerchietti colorati indicano soggetti con alcuni sintomi della malattia; i tondini colorati quelli con urina anormale. I tondini neri indicano portatori sofferenti del disturbo; i cerchietti neri possibili portatori.

Giorgio Guglielmo Federico, terzo Hannover re d'Inghilterra, in un ritratto ufficiale di Allan Ramsay, dipinto nel 1768. Nato nel 1738, Giorgio III governò dal 1760 al 1811 quando il quarto di una serie di attacchi, erroneamente ritenuti di « follia » e attribuiti oggi a uno squilibrio enzimatico ereditario noto come porfiria, rese necessaria la nomina di un reggente.

riodo del suo regno, la perdita delle colonie americane e per 18 anni l'angoscioso ruolo di condottiero senza il minimo segno di cedimento? Considerando le lotte politiche che lo assillavano, per non menzionare la sua numerosa e ribelle famiglia, ci si dovrebbe sorprendere che egli fosse stato sempre e del tutto sano, ammesso che la diagnosi psicoanalitica della sua personalità sia esatta.

Il fatto è che prima che la malattia fisica e la senilità lo rendessero inabile, Giorgio III ebbe solamente tre attacchi di follia e tutti insieme non superarono in durata i sei mesi. Ogni volta che il disturbo mentale si manifestava era accompagnato da gravi sintomi fisici che rendevano perplessi i medici e lo portavano a sfiorare la morte. « Non è soltanto il delirio della febbre e neppure una comune forma di follia » disse uno dei suoi medici, William Heberden jr. « L'intero quadro è piú o meno funzionalmente sregolato sia sul piano fisico che su quello mentale... [a causa di] una peculiarità di costituzione che non sono in grado di spiegare ».

Sir Henry Halford, altro eminente medico di quell'epoca, annotò: « Il caso del re sembra non aver precedenti negli annali della follia. »

Vi erano indizi sufficienti per risalire all'origine della malattia di Giorgio III se solo i medici avessero saputo interpretarli. I medici riferirono, per esempio, che i suoi attacchi apparivano causati « dalla forza di un umore » che prima si manifestava nelle gambe, poi passava negli « intestini » e infine si spingeva nel « cervello ». Per quanto oggi questa descrizione possa sembrare strana, è un resoconto significativo del corso seguito dagli attacchi del re con una ascesa progressiva dei sintomi dagli arti all'addome e infine al cervello. Di tutti i sintomi della malattia del re il piú significativo, quello che ci ha portato ora alla scoperta della vera natura della sua malattia, è il colore dell'urina. Almeno una mezza dozzina di volte i dottori che lo esaminavano notarono che l'urina del re era « scura », rossa oppure scolorata.

Considerati gli altri sintomi della malattia del re e le caratteristiche dei suoi attacchi è oggi evidente che queste discromie dell'urina erano dovute alla presenza di porfirine. La porfirina è un pigmento, contenuto nell'emoglobina del sangue, che normalmente viene metabolizzato nelle cellule del corpo. La sua presenza nell'urina, quindi, è segno di metabolismo alterato e precisamente dimostra l'incapacità delle cellule di trasformare la porfirina, presumibilmente a causa della mancanza del necessario enzima. La gravità clinica di questa deficienza fu inizialmente segnalata all'attenzione dell'ambiente medico nel 1908 dal medico londinese Sir Archibald Garrod il quale scoprí che « errori congeniti del metabolismo » potevano provocare gravi alterazioni. Da allora è stato provato come l'incapacità di metabolizzare la porfirina provoca una malattia chiamata porfiria che attacca il sistema nervoso. L'attacco inizia normalmente nel sistema nervoso autonomo, poi prosegue nei nervi periferici, nei nervi cranici e infine nel cervello stesso. All'acme dell'attacco il paziente è paralizzato e in stato agonizzante.

I sintomi presentati da Giorgio III, la sequenza del loro sviluppo e il crescendo della sua malattia costituiscono un caso di porfiria da manuale. I suoi attacchi cominciavano con coliche, costipazione e nausea, poi seguivano debolezza dolorosa degli arti, cosicché non poteva camminare né stare in piedi, accelerazione del polso, accessi di sudorazione, raucedine, disturbi visivi, difficoltà nell'inghiottire, insonnia intrattabile, aumento dell'eccitabilità, necessità di continuo movimento, vertigini, cefalea, tremori, stordimento e convulsioni. I medici descrissero cosí questo stato: « Delirio continuo ... tormentato da false immagini ... si rivolgeva continuamente a persone vive o morte come se fossero presenti ... assorto in visioni immaginarie ... la sua conversazione assomigliava ai particolari di un sogno nella sua stravagante confusione ».

Questi sintomi mentali sono manifestazione di uno stato tossico di sofferenza cerebrale. Anche gli altri aspetti della malattia del re erano caratteristici della porfiria; essi erano generalmente aggravati da modeste infezioni, le sue condizioni oscillavano con frequenza e ogni attacco era seguito da una lunga convalescenza. La porfiria è usualmente accompagnata da pressione sanguigna alta: naturalmente la pressione del re non veniva misurata, ma le ripetute crisi che fecero temere ai medici « un attacco di paralisi » possono essere state causate da ipertensione. Per quanto riguarda la malattia del 1765, fu probabilmente un leggero attacco di porfiria che non coinvolse il cervello.

Poiché la porfiria è una malattia ereditaria, abbiamo esaminato la storia medica dei consanguinei di Giorgio III. I documenti disponibili mostravano che nella sua famiglia i segni della porfiria risalivano al XVI secolo e riguardavano la sua antenata Maria, regina di Scozia. Il figlio di questa, re Giacomo, soffrí di coliche (che, disse al medico, aveva ereditato dalla madre) e diceva che la sua urina aveva il colore del suo vino favorito di Alicante. La sorella di Giorgio III, la regina Carolina Matilda di Norvegia e Danimarca (protagonista di molti romanzi e di un'opera di Verdi) morí a 23 anni di una misteriosa malattia, caratterizzata da una violenta paralisi progressiva. Alcuni dei bambini di Giorgio erano afflitti da questa malattia. Il figlio che gli succedette al trono, Giorgio IV, aveva una malattia che i suoi medici chiamavano « gotta informe » ma che deve certamente essere stata porfiria. La figlia di Giorgio IV, la principessa Carlotta, mostrò fin dall'infanzia caratteristici sintomi della malattia e morí in giovane età, probabilmente durante un attacco acuto. Il figlio di Giorgio III, Augusto duca di Sussex, ebbe gravi attacchi della malattia accompagnati da urine discromiche. Anche un altro figlio, il duca di Kent (padre della regina Vittoria), soffrí gravemente di coliche e morí di un attacco una settimana prima della morte di Giorgio III. La porfiria, introdotta nella casa di Brandeburgo-Prussia dalla sorella di Giorgio I, ebbe fra le sue vittime anche Federico il Grande. La malattia ha persistito nei discendenti di Giorgio III fino all'epoca odierna. Ne abbiamo esaminati alcuni e abbiamo trovato i caratteristici sintomi della porfiria tra cui le discromie delle urine. Secondo i nostri test di laboratorio questi componenti la famiglia reale soffrivano di una forma di porfiria che rende la pelle sensibile al sole e alle ferite.

Alla luce delle conoscenze mediche del XX secolo, vediamo che la figura di Giorgio III, cosí come il suo fisico tormentato da continue sofferenze, fu vittima di un crudele equivoco. Gli episodi di follia erano semplicemente proteste di una mente temporaneamente sconvolta da un cervello intossicato. Il morbo reale non era « pazzia » o « mania » o « psicosi maniacodepressiva », qualunque sia il significato di questi vaghi termini nell'era moderna della medicina diagnostica e clinica. In parte a causa della arretratezza delle conoscenze mediche di quel tempo e in parte a causa della posizione del re, la malattia fisica di cui egli soffriva non venne affatto considerata. Con una dieta appropriata, evitando determinati farmaci e usando un trattamento piú razionale, i suoi attacchi avrebbero potuto essere notevolmente ridotti.

The waistcoat was taken off at nine - Blisters dressed. Discharged well - very sore - Pulse 96 - perspired through the night profusely - but little sleep - & very quiet & in good humour for the most part. - Tongue white.

Copy of the Letter to the Prince of Wales - not signed by Dr. Willis
The strait waistcoat was taken off from his Majesty at noon yesterday, but was put on again soon after two o'clock, & was not taken off till nine this morning. His Majesty has not had more than an hour's sleep in the night, is good humoured, but as incoherent as ever: Mr. Keate is of opinion that the blisters on his legs are in a healing state —

Bulletin —
His Majesty passed the night quietly, but with little sleep - & is quiet this morning —

Sometime between 10 & 11 - fell fast asleep upon a Sopha - nearly an hour - awaked & has been composed.
Before He fell asleep He had a very pertinent conversation with my Father - concerning Mr. Smelt & religion - his sense both & with thoughts but too much refinement - &c

Il « Physicians' Journal », un resoconto cronologico della malattia del re, registra gli eventi del 23 e 24 dicembre 1778 come segue: « La camicia di forza è stata tolta alle 9 - & i salassi cicatrizzati - scaricato bene - molto sofferente - polso 26 - ha sudato molto durante la notte - ma ha dormito poco - & molto quieto & quasi sempre di buon umore - Lingua bianca ». Copia della lettera al principe di Galles - non firmata dal Dr. Willis: « La camicia di forza è stata tolta a Sua Maestà ieri a mezzogiorno ma è stata rimessa alle 2 & non è stata tolta fino alle 9 di stamattina. Sua Maestà non ha dormito stanotte piú di un'ora, è di buon umore ma incoerente come sempre. Mr. Keate è dell'opinione che i salassi sulle gambe stiano per cicatrizzarsi ». Bollettino: « Sua Maestà ha passato una notte tranquilla ma ha dormito poco - & stamattina è quieto - Fra le 10 & le 11 si è addormentato di colpo su un sofà - per circa un'ora - si è svegliato & è stato molto calmo. Prima di addormentarsi ha avuto una sensata conversazione con mio padre [Dr. Willis] riguardante Mr. Smelt & la religione con molto buon senso ma a volte con troppe sottigliezze & c. » [fine della pagina di testo riportata].

Medaglione di porcellana eseguito da Josiah Wedgwood per celebrare la guarigione del re. Mostra Giorgio III incoronato di alloro e porta l'iscrizione « salute recuperata ».

La simmetria e la scienza

Il concetto intuitivo di simmetria, precisato in matematica con la teoria dei gruppi, costituisce il filo conduttore di tutti gli sviluppi, passati e recenti, delle varie scienze

di Beniamino Segre

Di fronte al multiforme aspetto del mondo che ci circonda si è subito portati a cercare di organizzarlo attraverso un'analisi, piú o meno approfondita, tesa a stabilire utili accostamenti che portino a semplificazioni, a equilibri o a simmetrie. Queste ultime hanno compiti orientativi, illustrativi e di sintesi e rispondono anche a chiare esigenze estetiche poggianti a loro volta su ben definite motivazioni psicologiche.

È proprio in questa accezione ampia, e in parte sfumata, che è stata inizialmente usata la parola *simmetria*, soprattutto nelle arti figurative da Policleto a Dürer, in accordo con le parole di Vitruvio secondo le quali « la simmetria risulta dalla proporzione la quale è commisurazione tra il tutto e le varie parti che lo compongono ». In questa accezione la parola simmetria fa il suo primo ingresso anche nella scienza, dato che gli antichi greci chiamavano simmetriche o asimmetriche due grandezze omogenee a seconda che ammettessero o no una misura comune, cioè, in termini moderni, a seconda che risultassero o no fra loro commensurabili.

Alla parola simmetria vennero poi attribuiti significati tecnici circoscritti e precisi, variabili con le circostanze e il progresso scientifico, secondo un procedimento evolutivo che ha dato luogo a concezioni paragonabili a quelle degli antichi ma perfezionate da concrete valutazioni oggettive e basate su appropriate e talvolta complesse formulazioni matematiche. Il caso tipico di simmetria intesa in questo senso è quello esemplificato dalla relazione che intercede tra i punti di un oggetto e quelli della sua immagine rispetto a uno specchio piano. Questa simmetria, detta « bilaterale », si trova approssimativamente nei vertebrati e è l'esempio piú semplice di simmetria intesa nel senso moderno del termine.

Questo concetto si estende quando si prendono in considerazione le varie simmetrie multilaterali che si presentano, tra l'altro, nella forma dei cristalli e – piú generalmente – nei cosiddetti fenomeni periodici, oltre che in proprietà di moltissimi oggetti della vita quotidiana. Ulteriori generalizzazioni stanno alla base di molti fra i piú recenti progressi della matematica e della fisica.

Nel procedimento evolutivo che abbiamo delineato ha talvolta avuto importanza determinante il presentarsi di inattese irregolarità o asimmetrie che sono state giustificate o evitate modificando opportunamente la nozione stessa di simmetria. Sono stati inoltre realizzati approfondimenti notevoli nell'intento di spiegare perché si determinino date simmetrie o asimmetrie oppure nell'intento di indagare se il presentarsi delle une o delle altre vada attribuito al caso o non consegua invece logicamente da leggi di natura già acquisite.

Del resto, le simmetrie piú semplici e piú comuni hanno speciali ragion d'essere in quanto a esse risultano sottoposte categorie basilari, a principiare da quella del pensiero umano e della logica che lo governa. È quindi naturale che molti dei progressi avutisi nei settori piú disparati si impernino su fenomeni riguardanti la simmetria e su deduzioni e raffronti a essi attinenti.

Cercheremo nel seguito di delineare il carattere universale e la forza di penetrazione e di sintesi del concetto di simmetria, inteso in questo senso, nei vari settori della scienza con riferimenti anche alle diverse arti.

La simmetria in matematica

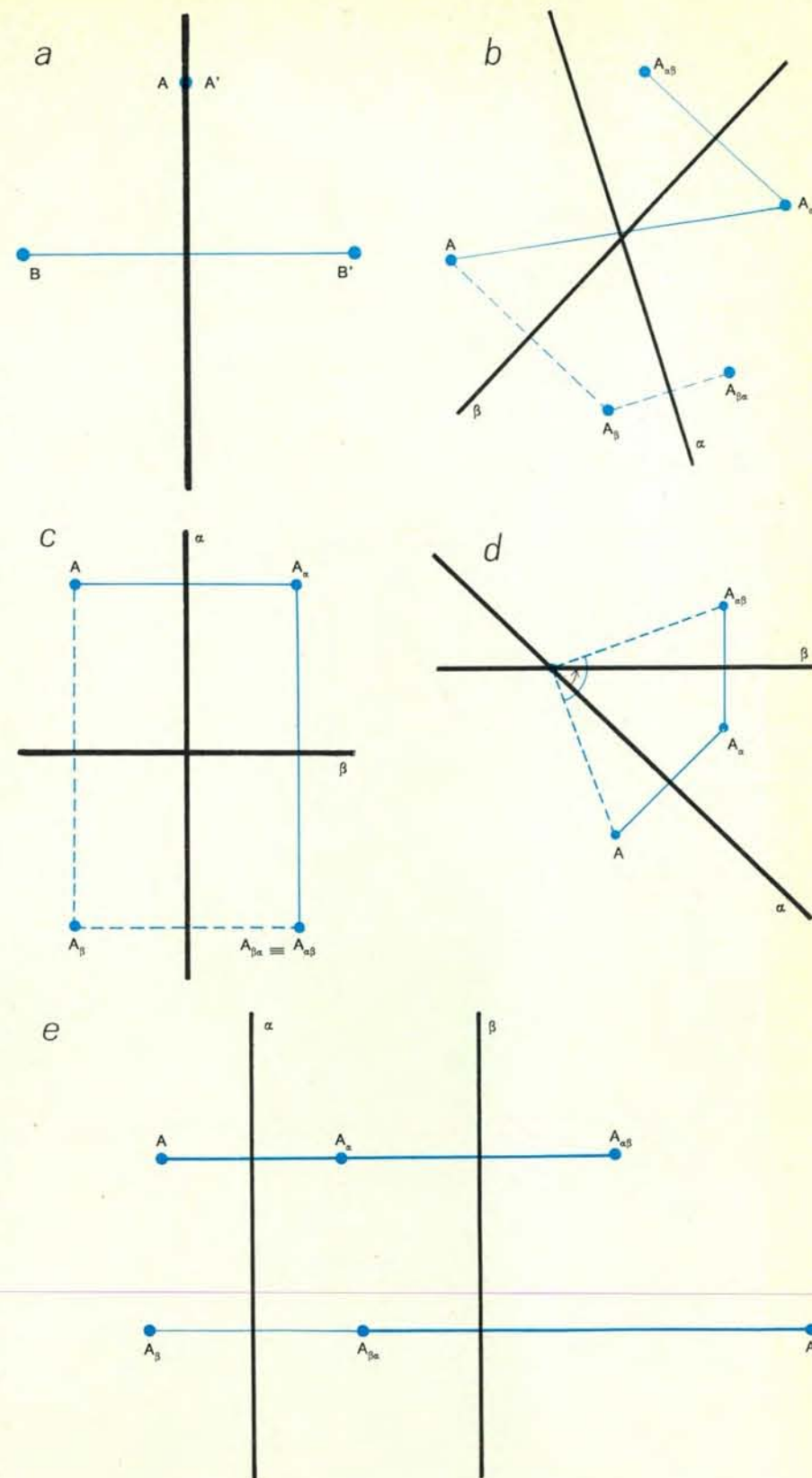
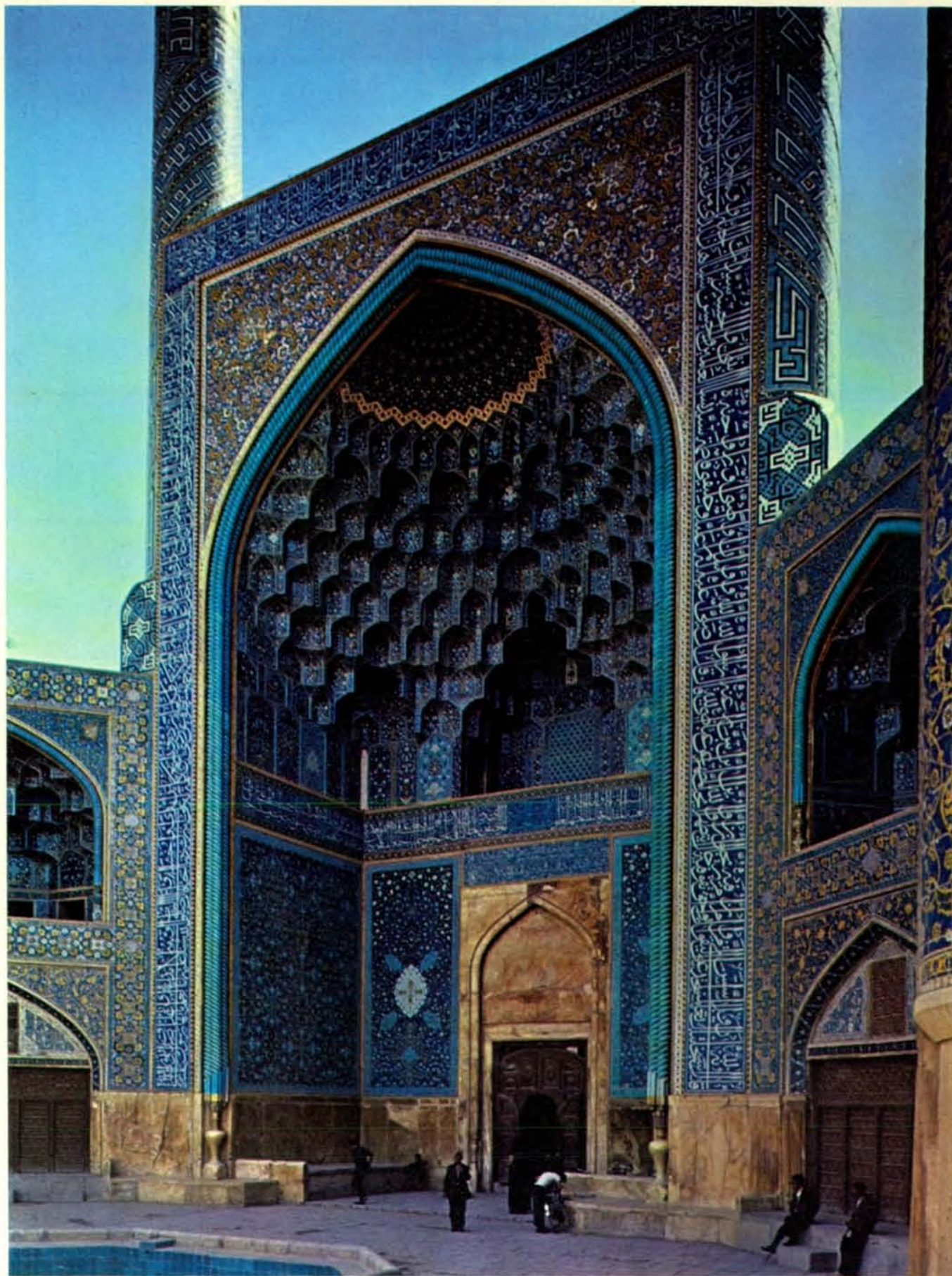
Il concetto di simmetria bilaterale ha una chiara formulazione geometrica. Nello spazio ordinario (euclideo a tre dimensioni), fissato comunque un certo piano α, resta definita una relazione che associa fra loro due punti se questi coincidono in un punto del piano α o se risultano congiunti da un segmento che incontra il piano α ortogonalmente nel suo punto di mezzo. Due punti che godano di questa proprietà si dicono simmetrici rispetto ad α; la trasformazione che muta un qualsiasi punto dello spazio nel suo simmetrico si dice *simmetria* rispetto ad α e può essere anch'essa denotata con il simbolo α. È chiaro che ogni simmetria di questo tipo conserva le distanze, gli angoli ecc., cioè non muta o lascia *invarianti* quelle che si definiscono le « proprietà metriche » dello spazio.

Quando nello spazio euclideo si prendono in considerazione, in un certo ordine, piú piani qualsiasi α, β, γ, si possono effettuare successivamente le simmetrie rispetto a essi. La corrispondenza che muta ogni punto dello spazio nel punto che da esso si ottiene applicando le simmetrie α, β, γ, in questo ordine, si chiama prodotto di tali simmetrie e può essere denotata con il simbolo $\alpha\beta\gamma$. Ogni trasformazione di questo tipo è una *congruenza* (o uguaglianza o isomeria) in quanto muta un segmento qualunque in un segmento di ugual lunghezza (o a esso congruente).

I prodotti di piú simmetrie godono ovviamente della proprietà *associativa*: comunque siano scelti tre (o anche piú) piani α, β, γ, la congruenza $\alpha\beta\gamma$ si può infatti ottenere sia come prodotto di $\alpha\beta$ e γ sia come prodotto di α e $\beta\gamma$. Non godono invece della proprietà commutativa giacché i prodotti $\alpha\beta$ e $\beta\alpha$ risultano in generale distinti (*si veda la figura a fronte*). Infatti si ha $\alpha\beta = \beta\alpha$ se e solo se i piani α e β coincidono o sono tra loro perpendicolari. Nel primo caso il prodotto $\alpha\beta$ non è altro che la trasformazione che muta ogni punto in se stesso, trasformazione che si chiama *identità* e che si suole indicare con il simbolo 1; si ha quindi, per ogni scelta del piano α, $\alpha^2 = \alpha\alpha = 1$. Se invece i piani α e β non coincidono, si hanno due casi diversi secondo che essi si incontrino o no. Nel primo caso la congruenza $\alpha\beta$ non è altro che la rotazione, attorno alla retta d'incontro dei due piani α e β, di un angolo uguale (in grandezza e verso) al doppio dell'angolo fra essi compreso. Nel secondo caso, ossia supposto che i due piani siano paralleli, la congruenza $\alpha\beta$ non è altro che la *traslazione*, nella direzione perpendicolare ai piani α e β, di un segmento uguale (in grandezza e verso) al doppio della distanza tra questi.

È possibile dimostrare che ogni congruenza ω, cioè qualsiasi trasformazione dello spazio che conservi le distanze, può venire espressa – in infiniti modi – come prodotto $\alpha\beta \ldots \mu\lambda$ di simmetrie. La trasformazione inversa, cioè la trasformazione che dà come prodotto (in qualsiasi ordine) con la trasformazione diretta l'identità, viene indicata con il simbolo ω^{-1} e è anch'essa una congruenza esprimibile con il prodotto $\lambda\mu \ldots \beta\alpha$.

Un altro dato importante è il fatto che, per ogni decomposizione di una data congruenza in un prodotto di simmetrie, il numero dei fattori conserva la propria *parità*. Ne segue che le congruenze dello spazio risultano o *congruenze dirette*, ottenibili cioè – come l'identità – quali prodotti di un numero pari di simmetrie, oppure *congruenze inverse*, ottenibili – come le singole simmetrie – quali prodotti di un numero dispari di simmetrie. Se due figure F e F' dello spazio sono mutate l'una nell'altra da una congruenza ω si hanno quindi due alternative secondo il carattere diretto o inverso di ω. Nel primo caso, è possibile trasportare rigidamente F fino a sovrapporlo a F' in modo che ogni punto di F vada a coincidere con il punto di F' che a esso corrisponde mediante ω. Viceversa, due figure F e F', deducibili l'una dall'altra mediante un movimento rigido, sono sempre riferibili l'una all'altra mediante una corrispondenza puntuale subordinata a una congruenza diretta. Nel secondo caso questo non è piú vero; esistono cioè figure F e F', fra loro congruenti sotto la condizione necessaria che siano ottenibili l'una dall'altra mediante una congruenza inversa, che non sono però tra loro sovrapponibili mediante alcun movimento rigido. Esempi ben noti di questo caso sono dati dai due guanti di uno stesso paio o da due eliche fra loro simmetriche rispetto a uno stesso piano e quindi avvitate attorno al rispettivo asse in senso opposto.

Da tutto questo si trae l'importante conseguenza che lo spazio può essere dotato di due diverse *orientazioni* che vengono singolarmente conservate da ogni congruenza diretta e scambiate tra

Rappresentazione schematica dei vari casi che si presentano nella simmetria rispetto a uno o due piani. In (*a*) si ha la semplice simmetria speculare che porta *B* in *B'* e *A* in *A'*; *A* e *A'* coincidono perché sono sul piano di simmetria. In (*b*) è dimostrata la non validità della proprietà commutativa; infatti, la simmetria $\alpha\beta$ (*colore continuo*) non coincide con la $\beta\alpha$ (*colore tratteggiato*). La commutatività si ha soltanto quando i due piani coincidono o sono perpendicolari (*c*). Se i due piani α e β non coincidono ma si intersecano, la simmetria $\alpha\beta$ è la rotazione attorno alla retta d'incontro dei due piani di un angolo uguale al doppio di quello fra essi compreso (*d*). Se i piani sono paralleli, la simmetria $\alpha\beta$ è una traslazione nella direzione normale ai piani di un segmento uguale (in grandezza e verso) al doppio della distanza tra questi (*e*).

Il grande portale di ingresso della moschea del re a Isfahan, nell'Iran, la cui costruzione risale al 1612. All'evidente simmetria bilaterale dell'intero complesso si aggiungono le varie simmetrie delle decorazioni, molto piú complesse. Accanto a simmetrie traslatorie rilevabili soprattutto nelle fasce si hanno infatti diversi mosaici bidimensionali altamente simmetrici. Caratteristica è la parte superiore del portale in cui elementi di simmetria tridimensionale si aggiungono a quelli bidimensionali.

Tra i vari tipi di simmetria che si riscontrano negli esseri viventi la piú interessante è la naturale tendenza a seguire forme a spirale, che si riscontra anche in questa dalia (*sopra*).

La tendenza dell'uomo – conscia o inconscia – verso forme simmetriche è ben visibile in questa miniera di rame a cielo aperto (*sotto*) che si trova nei pressi di Salt Lake City negli Stati Uniti.

1. *Proprietà di chiusura:* in G esiste e è unico il prodotto $\alpha\beta$ di due elementi α e β comunque scelti in G.

2. *Proprietà associativa:* comunque scelti in G gli elementi α, β, γ si ha $(\alpha\beta)\gamma = \alpha(\beta\gamma)$.

3. *Esistenza dell'elemento neutro:* in G esiste un elemento neutro, o unità, designato con il simbolo 1 tale che $\alpha 1 = 1\alpha = \alpha$ per ogni α di G.

4. *Esistenza dell'inverso:* per ogni α di G esiste un elemento, designato con il simbolo α^{-1}, tale che $\alpha\alpha^{-1} = \alpha^{-1}\alpha = 1$.

5. *Proprietà commutativa:* comunque siano scelti α e β in G si ha $\alpha\beta = \beta\alpha$.

Condizioni necessarie e sufficienti affinché un insieme abbia struttura di gruppo. Le prime quattro proprietà sono comuni a tutti i gruppi, la quinta caratterizza invece i gruppi abeliani o commutativi.

loro da ogni congruenza inversa. Per assegnare una di tali orientazioni occorre e basta scegliere una figura F, per esempio una qualsiasi elica circolare, che non risulti sovrapponibile alla sua simmetrica nello spazio rispetto a un piano, e quindi neppure rispetto a qualsiasi altro piano.

Alla base della geometria elementare si può cosí porre la considerazione delle simmetrie rispetto a un piano e dei loro prodotti. Ciò porta allo studio della totalità delle congruenze dello spazio e all'opportunità di dotare lo spazio di una o dell'altra delle due possibili orientazioni. Nel mondo fisico la scelta fra queste ultime può venir stabilita concretamente distinguendo fra destra e sinistra, per esempio indicando come destro uno dei due guanti di un paio.

Una delle piú importanti nozioni a cui si può giungere generalizzando queste considerazioni è quella di *gruppo* (astratto). Consideriamo un insieme G (finito o infinito) di elementi in cui sia definita una legge di composizione (o moltiplicazione) che, applicata a due elementi qualsiasi dell'insieme, dia come risultato un elemento che appartenga ancora a G; si dice che questo insieme è un gruppo (o che possiede struttura gruppale) se la legge di composizione è associativa e invertibile nel senso precisato dalla tabella qui sopra.

Si chiama poi *sottogruppo* di G una qualsiasi parte o sottoinsieme di G che risulti ancora un gruppo rispetto a quella medesima composizione. Affinché un sottoinsieme di G sia un sottogruppo occorre e basta che per esso valgano la proprietà di chiusura e quella dell'esistenza dell'inverso α^{-1} di ogni suo elemento α, in quanto la proprietà associativa è allora soddisfatta di conseguenza.

I piú semplici sottogruppi G' di G sono quelli – detti ciclici e che risultano sempre abeliani, cioè commutativi – generati dai singoli elementi di G. Essi comprendono un elemento α, comunque fissato in G, e le sue varie potenze α^h a esponente intero (positivo, nullo o negativo), ove si ponga $\alpha^0 = 1$, $\alpha^1 = \alpha$, $\alpha^2 = \alpha\alpha$, ... e inoltre $\alpha^{-2} = (\alpha^{-1})^2$ ... A seconda che il sottogruppo suddetto risulti *finito* (cioè costituito da un numero n finito di elementi distinti) o *infinito*, l'elemento α si dice periodico (di periodo od ordine n) o aperiodico. Nel primo caso si dice che l'elemento α è di ordine n se n è il piú piccolo intero positivo tale che $\alpha^n = \alpha^0 = 1$; nel secondo caso, invece, due potenze α^h e α^k coincidono soltanto se $h = k$.

Un altro esempio importante di gruppo, uno che ci interessa assai direttamente, si ottiene a partire da un insieme I di un numero qualsiasi (finito o infinito) di elementi considerando la totalità T delle trasformazioni, o corrispondenze biunivoche, di I in se stesso. T è ovviamente un gruppo in quanto soddisfa alle quattro condizioni enunciate sopra e la sua unità è data dalla trasformazione identica di I.

Nell'ipotesi in cui I sia l'insieme dei punti dello spazio, la totalità delle congruenze di questo è un sottogruppo del corrispondente T. Tale totalità è quindi un gruppo C in cui le congruenze dirette (ma non le inverse) costituiscono un sottogruppo C'. Quest'ultimo è il piú semplice esempio di *gruppo continuo* (o di Lie, dal nome del matematico norvegese Sophus Lie), e risulta ∞^6 (o di dimensione 6) in quanto i suoi elementi possono farsi dipendere con continuità dai valori di 6 parametri. Gli elementi periodici di ordine n di C' sono le rotazioni di $360°/n$ attorno a una retta dello spazio; per $n = 2$ essi si riducono alle simmetrie rispetto a un asse rettilineo.

Lo studio della geometria euclidea dello spazio – come è stato per la prima volta posto in evidenza da Hermann von Helmoltz – è sostanzialmente equivalente allo studio del suddetto gruppo C. Per esempio, l'esistenza in C del sottogruppo C', il quale ha in C indice 2 (ciò che equivale a dire che gli elementi di C non appartenenti a C' si ottengono tutti e soli da uno di essi comunque fissato col moltiplicarlo, a destra o a sinistra, per i singoli elementi di C'), permette la esistenza di due (e soltanto due) orientazioni nello spazio; la considerazione di un punto, di una retta o di un piano nello spazio equivale alla considerazione del sottogruppo delle trasformazioni di C (o di C') che lasciano fisso l'elemento considerato; le traslazioni (e quindi anche i vettori) dello spazio costituiscono un gruppo continuo abeliano ∞^3, che è sottogruppo di C'; lo studio dei poligoni e dei poliedri regolari risulta in ovvia relazione con quello dei sottogruppi finiti di C, e cosí via.

Va infine rilevato che C (e quindi C') è sottogruppo di un gruppo piú ampio (a sette parametri e includente le similitudini) caratterizzabile come quello degli automorfismi dello spazio euclideo, cioè delle trasformazioni che mutano segmenti uguali in segmenti uguali.

Non è possibile ampliare C e C' in modo consimile nelle cosiddette geometrie non euclidee mentre questa possibilità ha importanti conseguenze nella geometria euclidea, come è stato segnalato nel 1872 dal matematico tedesco Felix Klein. Egli identificò infatti i singoli rami della geometria (euclidea o non euclidea, affine, proiettiva, conforme ecc.) con lo studio delle proprietà dei sottoinsiemi di un dato insieme (o spazio) che sono *invarianti* di fronte alle trasformazioni di un certo gruppo (*si veda la figura alle pagine 68 e 69*).

La simmetria nelle arti

La nozione di *cosmo*, intesa a significare l'ordine e la razionalità dell'universo, risale ai pitagorici che – a detta di Aristotele – la inquadravano nella loro dottrina in base alla quale « le cose sono numeri ». Su questa base poggiava infatti la loro teoria delle monadi che preludeva alla filosofia di Democrito ed elevava l'aritmetica e la musica ben al di sopra dei bisogni quotidiani, attraverso una concezione geometrica dei numeri interi che portava a un netto divario tra pari e dispari, all'introduzione dei numeri triangolari, quadrati ecc. e alla quale veniva collegato un suggestivo studio dei suoni e una fantasiosa mistica dei numeri secondo la quale, fra l'altro, nella volta stellata si doveva percepire « l'armonia delle sfere ».

La credenza nelle virtú magiche dei numeri si trova già del resto nella mentalità dell'uomo primitivo. Essa ha qualche manifesto addentellato con la natura gruppale dell'insieme dei numeri interi fra i quali l'operazione di composizione sia l'ordinaria addizione e quindi l'elemento neutro, o unità, sia lo zero. In un contesto di questo tipo, per esempio, le « simmetrie » non sono altro che le corrispondenze che associano due interi quando la loro somma ha un valore assegnato.

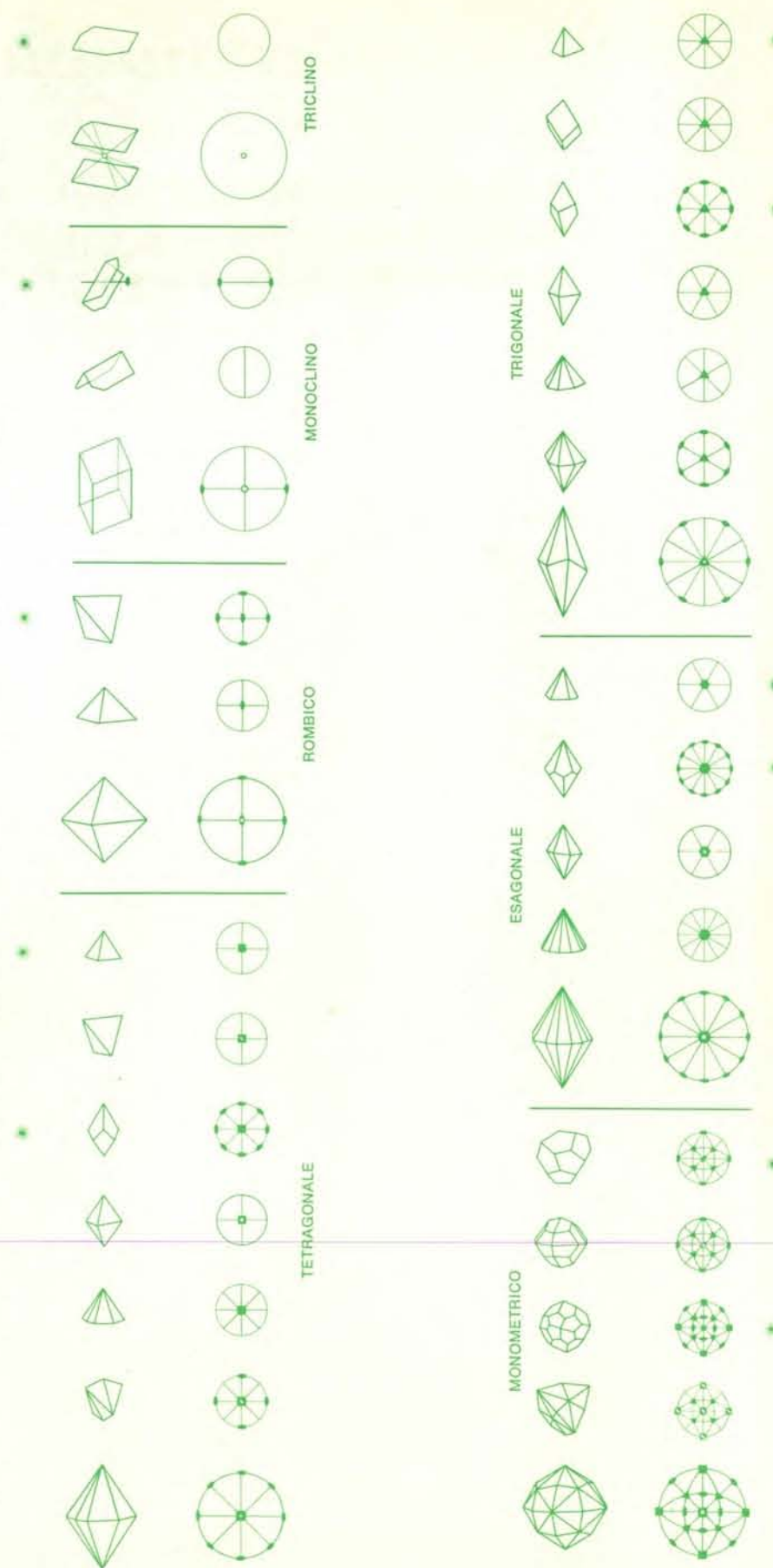
La struttura relativamente semplice che ne consegue, se poteva dimostrarsi adeguata a uno studio preliminare del mondo interiore e dei fenomeni dipendenti soltanto dal tempo, non doveva però dimostrarsi bastevole per un approfondimento della natura del mondo esterno, a cominciare dalle proprietà geometriche dello spazio. Di ciò si resero conto gli stessi pitagorici dopo la scoperta delle grandezze « asimmetriche », cioè dei numeri oggi detti irrazionali, scoperta che considerarono imbarazzante e scandalosa e che cercarono di tenere il piú possibile nascosta.

L'impostazione strettamente aritmetizzante si ritrova anche in tempi recenti in vari campi, persino nella matematica, e è compendiata nel celebre motto del matematico tedesco Leopold Kronecker secondo il quale « Dio creò i numeri interi, tutto il resto è opera dell'uomo ». Questa impostazione ha la sua utilità in determinati settori, mentre in altri si è confermata eccessivamente limitatrice. La piú ampia veduta razionalistica che porta ad avvalersi della matematica intesa in tutta la sua astrattezza e generalità ha invece condotto non soltanto a clamorosi successi nelle varie scienze fisiche e naturali, ma ha anche dato luogo a tendenze nuove nelle arti, specie in quelle figurative, con risultati smaglianti che sovente bastano a giustificare – se non a spiegare appieno – le affermazioni e le aspirazioni che a quella veduta cercano di ricollegare le suddette tendenze.

Di estremo interesse sarebbe per esempio una storia dell'arte che rendesse sufficientemente conto di ciò, con particolare riguardo all'influenza delle nozioni di simmetria e asimmetria e al relativo substrato matematico. Senza entrare nel vivo della questione, possiamo esemplificare alcune delle affermazioni e delle aspirazioni a cui abbiamo sopra accennato citando alcuni passi dell'architetto Le Corbusier e del compositore Rameau. Cosí scrive infatti Le Corbusier.

« L'architettura, la scultura e la pittura dipendono specificamente dallo spazio, legate come sono alla necessità di gestire lo spazio, ciascuna con le sue particolari tecniche. È essenziale il fatto che la chiave dell'emozione estetica sia una funzione spaziale. »

E ancora:

« ... la precisione necessaria in tutti gli atti destinati a far scattare un'emozione di qualità è di ordine matematico. Il prodotto è espresso da una sola parola: l'armonia. L'armonia è la felice coesistenza delle cose; coesistere implica una presenza duplice o multipla, e per conseguenza si riferisce ai rapporti e agli accordi; ma di quali accordi dobbiamo interessarci? Dell'accordo tra noi e il nostro ambiente, tra lo spirito dell'uomo e lo spirito delle cose,

Rappresentazione schematica dei 32 gruppi cristallografici e dei loro corrispondenti elementi di simmetria. Questi gruppi cristallografici corrispondono ad altrettanti gruppi finiti di rotazione, come fu dimostrato verso la fine del secolo scorso. Raggruppando opportunamente gli elementi di simmetria, i 32 gruppi vengono poi suddivisi nei sette ben noti sistemi cristallini che sono elencati nella figura. L'asterisco indica emiedria.

tra la matematica che è scoperta umana e la matematica che è il segreto del mondo. »

Un'impostazione di questo tipo è però ben lungi dall'essere condivisa da tutti gli artisti e si trova anche in contrasto con quella di alcuni filosofi. Bergson, per esempio, mette sullo stesso piano disordine e ordine, assimilando il primo a un ordine inaspettato o incompreso, trascurando o minimizzando le differenze che esistono tra un'argomentazione matematica e un'affermazione cervellotica, tra suono e rumore e cosí via. Una riprova di carattere storico e psicologico della inadeguatezza di questo punto di vista si ha rilevando la spontanea, e magari ingenua, ricerca di armonie e simmetrie da parte dell'uomo sin dai tempi piú remoti e dalla piú tenera età. Per esempio, nei disegni preistorici, come in quelli dei fanciulli, la figura umana viene sempre rappresentata frontalmente e simmetrica. Inoltre, fra le prime e piú elevate manifestazioni artistiche sono da segnalarsi quelle offerte dal disegno ornamentale nell'antico Egitto, nel mondo greco e in quello arabo, ove si trovano anticipati genialmente, anche se inconsciamente, risultati profondi della teoria dei gruppi.

La tradizione matematica speculativa egiziana, a cui doveva in seguito ricollegarsi quella greca, risale alla 18ª dinastia, cioè al XV secolo avanti Cristo. Essa si manifestò particolarmente negli splendidi e svariatissimi ornamenti che arricchiscono le tombe dei Faraoni, specie quelle di Tebe. È stato rilevato che è in pratica difficilissimo, o quasi impossibile, trovare una decorazione che sia stata originata indipendentemente e che non sia stata copiata da quelle egiziane. Ciò è dovuto al fatto che i gruppi finiti di congruenze in un piano euclideo, che mutano in sé un reticolo a maglie costituito da parallelogrammi ricoprenti il piano sono in tutto precisamente 17. Nel piano si hanno quindi soltanto 17 specie di simmetrie di tipo cristallografico che erano già tutte implicitamente note agli egiziani.

A tali conoscenze i greci ne aggiunsero soltanto alcune di minor rilievo derivanti dall'uso dei mosaici geometrici.

Un rinnovamento radicale si ha invece nell'arte degli arabi che andarono al di là delle suddette simmetrie disponendo nel piano o su una volta figure poligonali tra loro congruenti, opportunamente allacciate e intrecciate, e talora differentemente colorate, in modo da rendere cosí palesi i sottogruppi di un gruppo di movimenti riportanti uno di quei poligoni nell'altro. Attraverso i piú svariati tentativi giunsero, fra l'altro, a stabilire indirettamente l'impossibilità di inserire un pentagono regolare in un ornamento, il che ha la sua radice nel fatto che ciascuno degli elementi dei 17 gruppi cristallografici a cui abbiamo accennato ha il proprio periodo uguale a uno qualsiasi dei numeri da 1 a 6, tranne il 5 che rimane sempre escluso.

Assai piú difficile è l'analisi dei profondi legami che intercedono fra musica e matematica, se si eccettuano quelli piú manifesti che corrono tra acustica e aritmetica e in base ai quali il valore estetico di singole note o accordi deve essere riferito alla « semplicità » di certi numeri razionali. Questa ultima relazione trova probabilmente la sua ragione principale in convenzioni e abitudini della civiltà occidentale derivanti dalla tradizione pitagorica.

Risale infatti a Filolao, il primo pitagorico che abbia lasciato qualcosa di scritto, un'analisi accurata dell'ottava da lui detta « armonia ». Essa era l'intervallo abbracciato dalla lira, le cui quattro corde avevano lunghezze che stavano tra loro nei rapporti 6 : 8 : 9 : 12. Su questo era basata la nozione generale di intervallo tra due note, dato dal rapporto delle relative frequenze, e la definizione della scala musicale che comprendeva un'ottava di 12 intervalli successivi fra loro leggermente diversi. Tale scala diatonica fu in seguito ritoccata da J.S. Bach nella sua scala temperata costituita da 12 intervalli tra loro esattamente uguali, il che – dal punto di vista matematico – implicò l'uso dei logaritmi e l'abbandono dei rapporti semplici razionali. Anche in questo caso, però, i numeri interi entrano in gioco in modo determinante in quanto, per esempio, udiamo un *do* quando il nostro timpano percepisce $2^8 = 256$ vibrazioni al secondo.

Tutto questo ha permesso a Leibniz di dire che « la musica è un esercizio di aritmetica segreta e colui che vi si dedica ignora di maneggiare dei numeri ». Rameau, assi piú drastico, asserisce invece che « la musica non è una parte delle matematiche; è vero esattamente il contrario: le scienze sono una parte della musica poiché sono basate sulle proporzioni e la risonanza dei corpi sonori genera tutte le proporzioni ». Questa affermazione, di pretta marca pitagorica, va naturalmente presa con molte riserve; da essa affiora tuttavia l'opportunità di approfondire meglio il problema dei legami che uniscono la musica alla matematica.

A tal fine si può anzitutto pensare di istituire raffronti fra ritmi e canoni da una parte e i contributi ornamentali di egiziani e arabi dall'altra. Vi è però la differenza essenziale che i primi hanno il loro svolgimento nello scorrere unidimensionale del tempo, che non risulta al riguardo simmetrico. Vi sarebbe altresí da analizzare la struttura di date opere musicali dal punto di vista formale e vi sarebbe anche da analizzare in che modo la trascrizione e la esecuzione di un brano musicale verrebbero a modificarsi di fronte a mutamenti della scala diatonica che alterassero radicalmente il numero degli intervalli e le relative ampiezze. Tutto ciò suggerisce delicate questioni di ordine estetico e psicologico, oltre che pratico, il superamento delle quali potrebbe gettar luce sull'anzidetto problema.

Un modo concettualmente generale di esprimere con una formula matematica il « valore » di un'opera d'arte è stato proposto parecchi anni fa dal matematico americano George David Birkhoff. Tale tentativo di matematizzare l'estetica non è stato accolto dai critici d'arte con l'attenzione che forse meritava, soprattutto per le imperfezioni derivanti dal suo carattere rudimentale, dogmatico e in un certo senso semplicistico. Questo ovviamente non esclude che elaborazioni ulteriori possano migliorarlo fino al punto di renderlo accettabile, almeno condizionatamente. Non va tuttavia taciuta l'estrema difficoltà di un compito del genere, perseguibile soltanto attraverso svariate tappe successive in cui si tenga anche opportunamente conto degli elementi soggettivi e psicologici che intervengono nelle diverse valutazioni estetiche.

La simmetria nelle scienze della natura

Mentre l'arte decorativa si limita di solito a trattare problemi gruppali a una o a due dimensioni, esistono in natura oggetti dotati di simmetrie particolari il cui studio doveva portare in modo implicito a questioni gruppali tridimensionali anche prima che la nozione di gruppo venisse chiaramente formulata. Si tratta dei cristalli, e non v'è dubbio che, per esempio, le forme cubiche, ottaedriche e dodecaedriche in cui rispettivamente cristallizzano il salgemma, l'ossido di ferro e la pirite abbiano attirato l'attenzione dell'uomo sin dall'antichità.

Si ritiene infatti che l'idea del dodecaedro regolare (la cui costruzione geometrica risale probabilmente a Teeteto) sia stata suggerita dall'esame dei cristalli di pirite che si trovano in abbondanza nelle zolfare della Sicilia. È inoltre da rilevare come la costruzione dei cinque solidi platonici, e la dimostrazione del fatto che nello spazio non vi sono altri poliedri regolari convessi oltre a quelli, corrisponda a uno dei momenti salienti della geometria greca.

Se si assimila in astratto un cristallo a una porzione di materia con la quale si pensi di riempire uniformemente tutto lo spazio, si è portati a ritenere gli atomi distribuiti con regolarità nei punti di un reticolo, cioè nei vertici o nodi di una decomposizione dello spazio secondo parallelepipedi tra loro congruenti. Questa concezione, adombrata esattamente tre secoli or sono da Nicola Stenone, venne verificata per via sperimentale soltanto nel 1912 da Max von Laue mediante la diffrazione dei raggi X e viene oggi dimostrata teoricamente in termini di dinamica atomica.

Tale concezione reticolare implica la cosiddetta legge degli indici razionali, ottenuta empiricamente sin dal 1782 da R.J. Haüy. In base a questa legge, il cristallografo J.F.C. Hessel ottenne nel 1830 i 32 gruppi di rotazione ammissibili dai singoli reticoli spaziali basandosi sulla ipotesi che ogni elemento del gruppo debba necessariamente avere uno degli ordini da 1 a 6, escluso il 5. Ricerche successive dimostrarono che quest'ultima condizione non è di fatto per nulla restrittiva in quanto nello spazio euclideo esistono in tutto 230 gruppi discreti di congruenze ciascuno dei quali contiene tre traslazioni indipendenti: i quozienti di questi rispetto ai sottogruppi determinati dalle loro traslazioni si riducono proprio ai suddetti 32 gruppi finiti di rotazioni.

Questa impostazione geometrica ha fornito una suggestiva classificazione morfologica a priori dei cristalli e ispirato tutto un complesso di studi di fisica macroscopica, studi proseguiti fino ai giorni nostri con ricerche riguardanti il comportamento dei cristalli assoggettati a fendimenti, urti, pressioni, vibrazioni ecc., e attinenti alle loro proprietà fisiche (birifrangenza, piezoelettricità ecc.).

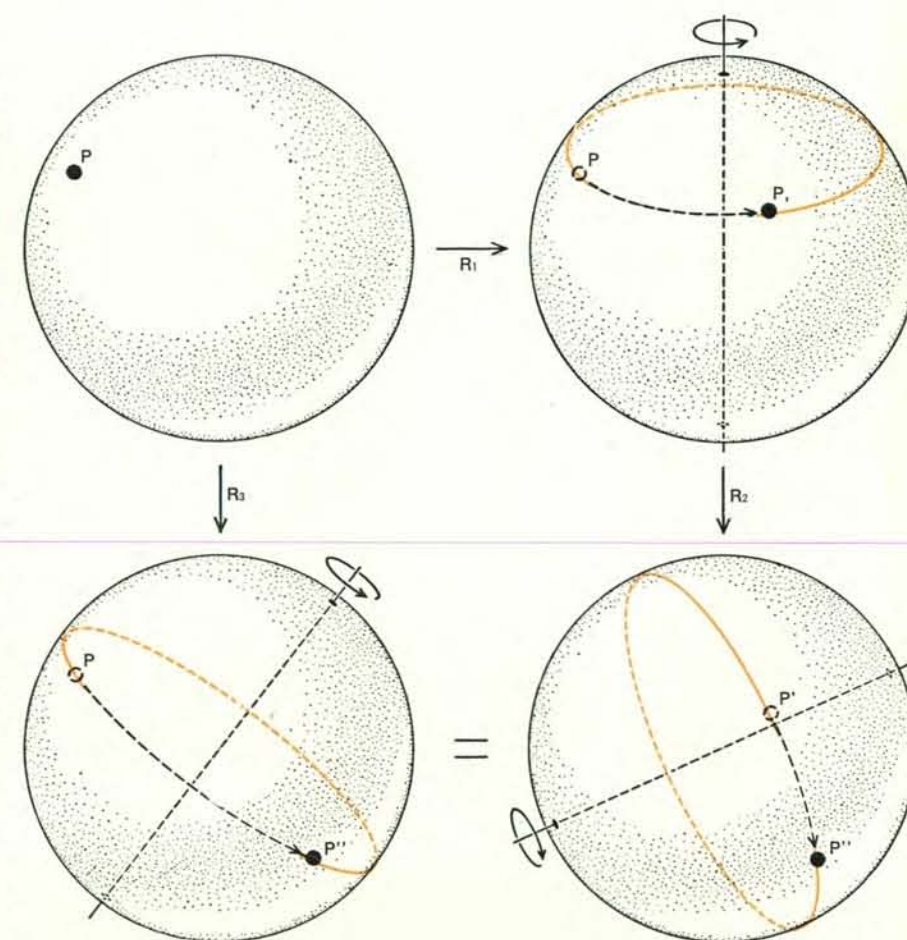
Com'è naturale, i fenomeni piú disparati risultano strettamente legati alle proprietà di simmetria dei cristalli che, per esempio, lasciano tra l'altro prevedere l'esistenza dei cristalli cosiddetti *enantiomorfi* (o emiedrici), cioè tra loro congruenti ma non sovrapponibili. Per quanto detto prima, affinché due cristalli fra loro simmetrici rispetto a un piano possano essere enantiomorfi occorre che ciascuno – preso a sé – ammetta una certa asimmetria implicante, fra l'altro, che esso non possegga nessun centro e nessun piano di simmetria.

Il primo esempio di cristalli enantiomorfi fu ottenuto in laboratorio da Louis Pasteur che riuscí a realizzare cristalli di acido racemico aventi identica composizione chimica ma comportamenti ottici opposti: una forma, identica a quella dell'acido tartarico presente nel mosto dell'uva, faceva ruotare verso destra il piano di polarizzazione della luce, l'altra, mai osservata prima di allora, lo faceva ruotare verso sinistra. Questa scoperta si dimostrò una pietra miliare nella scienza in quanto a essa si ispirarono altri studiosi che trovarono la possibile asimmetria del carbonio e dell'azoto, ponendo cosí le basi delle teorie strutturali dell'odierna stereochimica.

A questi sviluppi si ricollegano ulteriori ricerche volte a chiarire le cause dell'origine in natura delle sostanze levogire o destrogire e il comportamento degli organismi viventi nei loro confronti. Queste ricerche, iniziate da Pasteur secondo il quale fra vita e asimmetria enantiomorfa esisterebbero legami strettissimi, furono poi attenuate con gli sviluppi successivi che hanno già dato luogo a un imponente complesso di problemi e di risultati di biologia e di fisiologia del piú alto interesse. Si pensi per esempio al discordante comportamento dei batteri di fronte a derivati enantiomorfi di una stessa sostanza, agli effetti spesso nettamente diversi che questi ultimi esercitano sul gusto, sull'olfatto, sul sistema nervoso e cosí via.

Considerazioni del genere hanno anche notevole peso in morfologia vegetale e animale e in alcune questioni di genetica. La ricchezza delle forme in cui si manifesta la vita offre infatti i piú svariati tipi di simmetria, in parte giustificati da molteplici condizioni ambientali, di ricambio, locomotorie, ecc., ma le cui origini non sono ancora tutte pienamente chiarite.

In generale, la simmetria diventa piú ristretta quando si passa dagli esseri inferiori a quelli superiori: è di ordine infinito in quella sferica di certi protozoi (per esempio degli eliozoi), mentre è di ordine otto nelle meduse e di ordine tre nel giaggiolo. La simmetria pentagonale che, come si è detto, non può aver luogo nei cristalli, si presenta invece assai frequentemente nei fiori; fra gli animali inferiori la si ritrova negli echinodermi le cui larve ammettono però simmetria bilaterale.

Quest'ultimo tipo di simmetria è

Il gruppo delle rotazioni tridimensionali O_3 è definito come l'insieme di tutte le rotazioni di un ordinario spazio tridimensionale attorno a un centro fisso. Se R_1 e R_2 sono due di queste rotazioni, la loro combinazione si ottiene con una terza rotazione R_3.

presentato dai mammiferi soltanto nelle loro strutture fondamentali, in quanto a essa non sono normalmente soggetti gli organi interni. Inoltre, anche nelle apparenze esterne, la simmetria bilaterale risulta valida solo in prima approssimazione.

La differenziazione fra destra e sinistra nell'uomo e negli animali ha dato luogo a molte ricerche, per esempio a quelle concernenti il mancinismo, il carattere ambidestro delle scimmie, l'eterochilia nei crostacei, il verso di rotazione dell'elica nel guscio delle lumache, il modo di sovrapporsi delle ali degli insetti quando si chiudono. Analisi consimili sono state effettuate in botanica nello studio della fillotassi, cioè del modo di disporsi a elica delle foglie attorno a un ramo. Questa disposizione è stata a lungo collegata con le successioni di Fibonacci [legate come è noto al numero irrazionale $(\sqrt{5} - 1)/2 = 0{,}61803398...$ che esprime il rapporto fra la sezione aurea di un segmento e il segmento stesso], ma il legame non sembra pienamente confermato.

Sviluppi matematici atti a giustificare e a chiarire le situazioni che in natura si presentano con caratteristiche di spiccata regolarità sono stati escogitati da parecchi secoli e vengono ancora sviluppati con successo in diversi campi basandoli su opportune considerazioni di simmetria o di economia. Un esempio tipico è quello della forma dei favi delle api che, come è stato dimostrato, è tale da render minima la quantità di cera impiegata nella loro costruzione.

La simmetria nella fisica

La fisica è, fra le varie discipline sperimentali, quella che maggiormente si accosta alla matematica e è quindi naturale che in essa la nozione piú ampia di simmetria abbia avuto e continui ad avere un ufficio essenziale, pur modificandosi ed evolvendosi di continuo.

Un esempio storicamente assai importante è quello dato dal punto di inizio di Archimede nella formulazione del principio della leva; Archimede partí infatti dall'osservazione che due pesi uguali posti sui due piatti di una bilancia a bracci uguali devono farsi equilibrio dato che l'intera configurazione è simmetrica rispetto al piano mediano della bilancia. Anche la fondamentale legge archimedea dell'idrostatica può ottenersi in base a una considerazione di invarianza che corrisponde al fatto che la pressione idrostatica esercitata da un fluido su una cavità non dipende dalla materia con cui questa è riempita.

Altri modi di intendere e di applicare la simmetria si ritrovano nell'ottica geometrica e nella dinamica dei sistemi materiali, rispettivamente con il principio di Fermat (che corrisponde al principio della minima azione nella meccanica) e con quello di d'Alembert (o dei lavori virtuali). Il primo di essi afferma che nei vari fenomeni di riflessione, rifrazione ecc., la luce si propaga in modo da impiegare un tempo minimo o massimo; il secondo si enuncia dicendo che, durante il moto di un sistema materiale, vi è costantemente equilibrio fra le forze attive, le forze vincolanti e le forze di inerzia. Concezioni cosí semplici, e in un certo senso intuitive, possono venir poste alla base di vastissimi capitoli della fisica matematica; considerazioni analoghe si utilizzano in numerosi altri rami, per esempio nella teoria del potenziale in cui i procedimenti di simmetrizzazione basati sui teoremi della media hanno importanza notevolissima.

Anche la mancanza di simmetria, come è già stato detto a proposito della cristallografia, della chimica e delle scienze naturali, è di interesse fondamentale per la fisica, come sottolineò nel 1894 Pierre Curie in un suo scritto in cui si afferma che:

« Certi elementi di simmetria possono coesistere con certi fenomeni, ma non sono necessari. È invece necessario che certi elementi di simmetria non esistano. È l'asimmetria che crea il fenomeno ».

Queste vedute hanno esercitato una grande influenza sugli sviluppi della fisica nel nostro secolo e sono state richiamate in causa nel 1962 dagli esperimenti di Lee e Yang con il cobalto-60, esperimenti che dimostrano come nelle interazioni deboli non sia conservata la parità (simmetria tra un oggetto e la sua immagine speculare) dato che il ^{60}Co emette raggi β con preferenza in certe direzioni. I substrati invariantivi restano comunque la base di tutti i progressi della fisica, anche dei piú recenti.

Un substrato di questo tipo viene ad assumere aspetti chiaramente gruppali nella teoria della relatività; in essa lo spazio fisico viene geometrizzato in un continuo quadridimensionale, o cronotopo, dotato però di una struttura gruppale soltanto parzialmente analoga a quella degli spazi euclidei. Infatti, per esempio, il cronotopo – a differenza degli spazi euclidei – non è dotato di omogeneità o di isotropia totale in quanto nessun suo automorfismo può mutare una direzione spaziale in una temporale.

Anche nella meccanica quantistica il punto di vista gruppale ha avuto e continua ad avere una primaria importanza. In essa uno stato fisico, per esempio quello di un determinato atomo e dei suoi elettroni, può essere rappresentato mediante un vettore in uno spazio a infinite dimensioni detto spazio di Hilbert. Due stati fisici che derivino l'uno dall'altro mediante una rotazione dello spazio fisico (accompagnata eventualmente da una sostituzione effettuata sui loro elettroni) si rappresentano nello spazio di Hilbert in una trasformazione lineare tra i corrispondenti vettori. In questo modo la parte piú elevata della meccanica quantistica viene ricondotta a problemi matematici della teoria delle rappresentazioni di un gruppo mediante trasformazioni lineari.

Ad altre questioni gruppali, in parte ancora da risolvere, è stato in questi ultimi anni ridotto lo studio delle cosiddette particelle elementari. Il punto di partenza dei risultati finora ottenuti (notevoli soprattutto dal punto di vista classificatorio) è stata l'ammissione che fra le diverse particelle debbano intercorrere relazioni di approssimata simmetria (*si veda la figura a pag. 70*) relazioni precisate matematicamente sfruttando la teoria dei gruppi di Lie (insiemi in cui è definita sia una struttura algebrica di gruppo sia una struttura topologica, con opportune relazioni di compatibilità tra le due strutture).

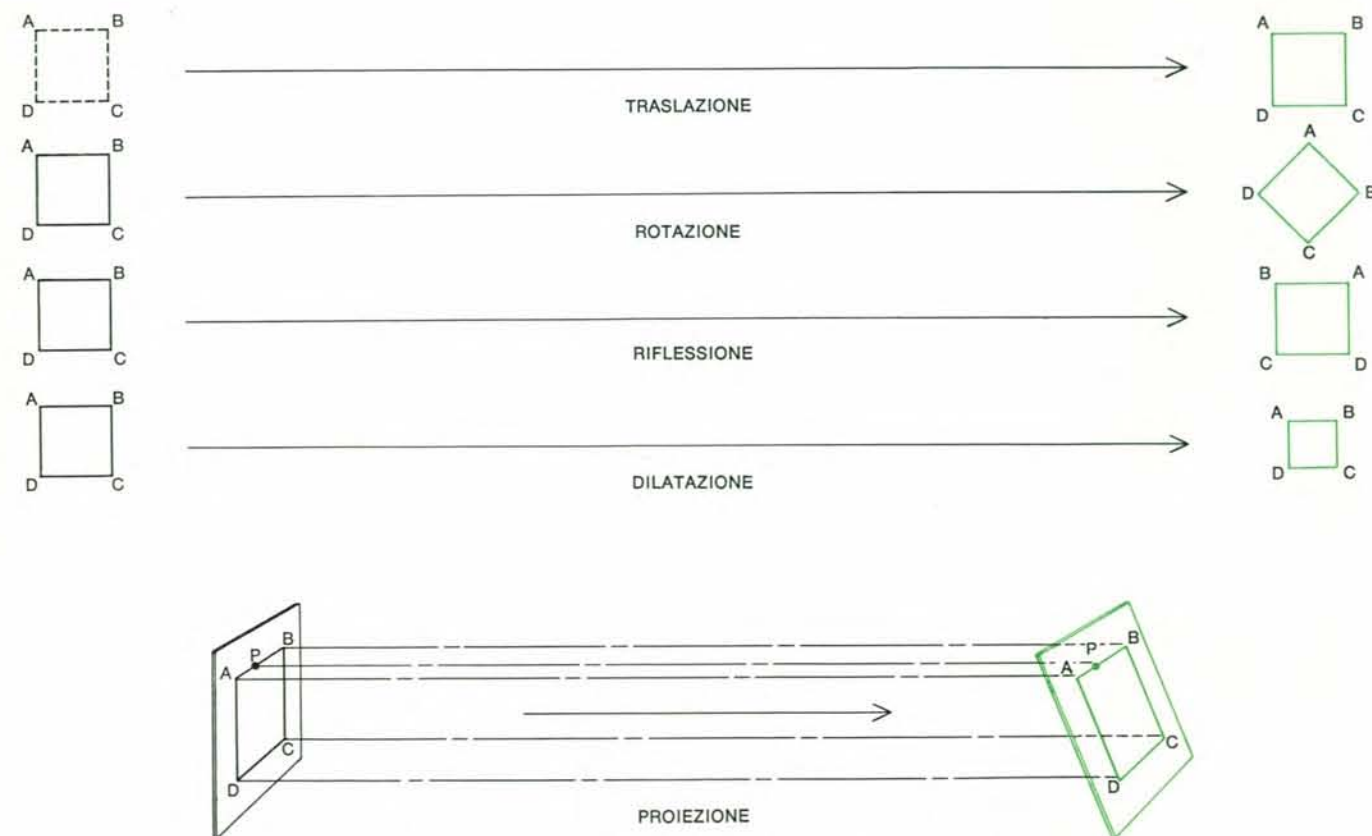
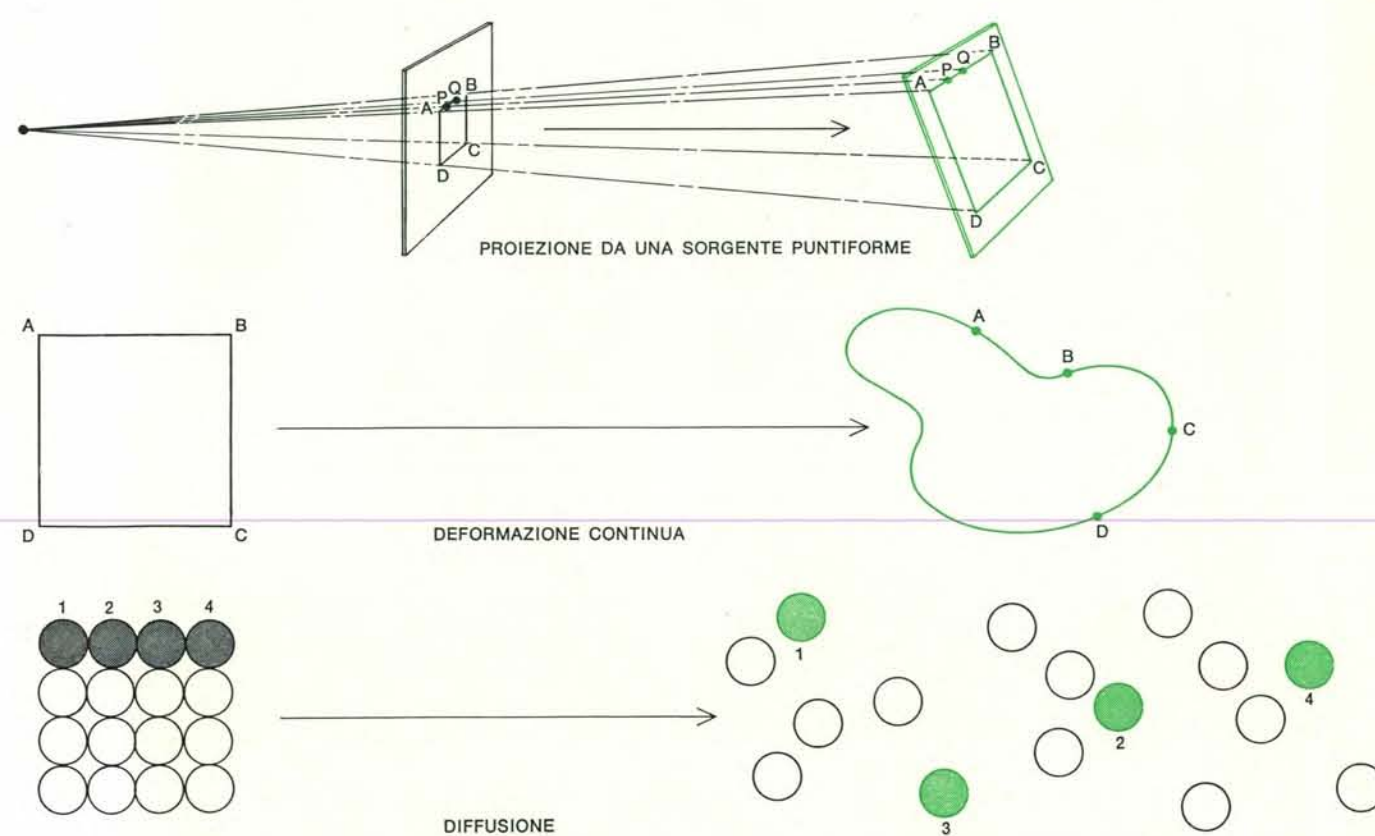
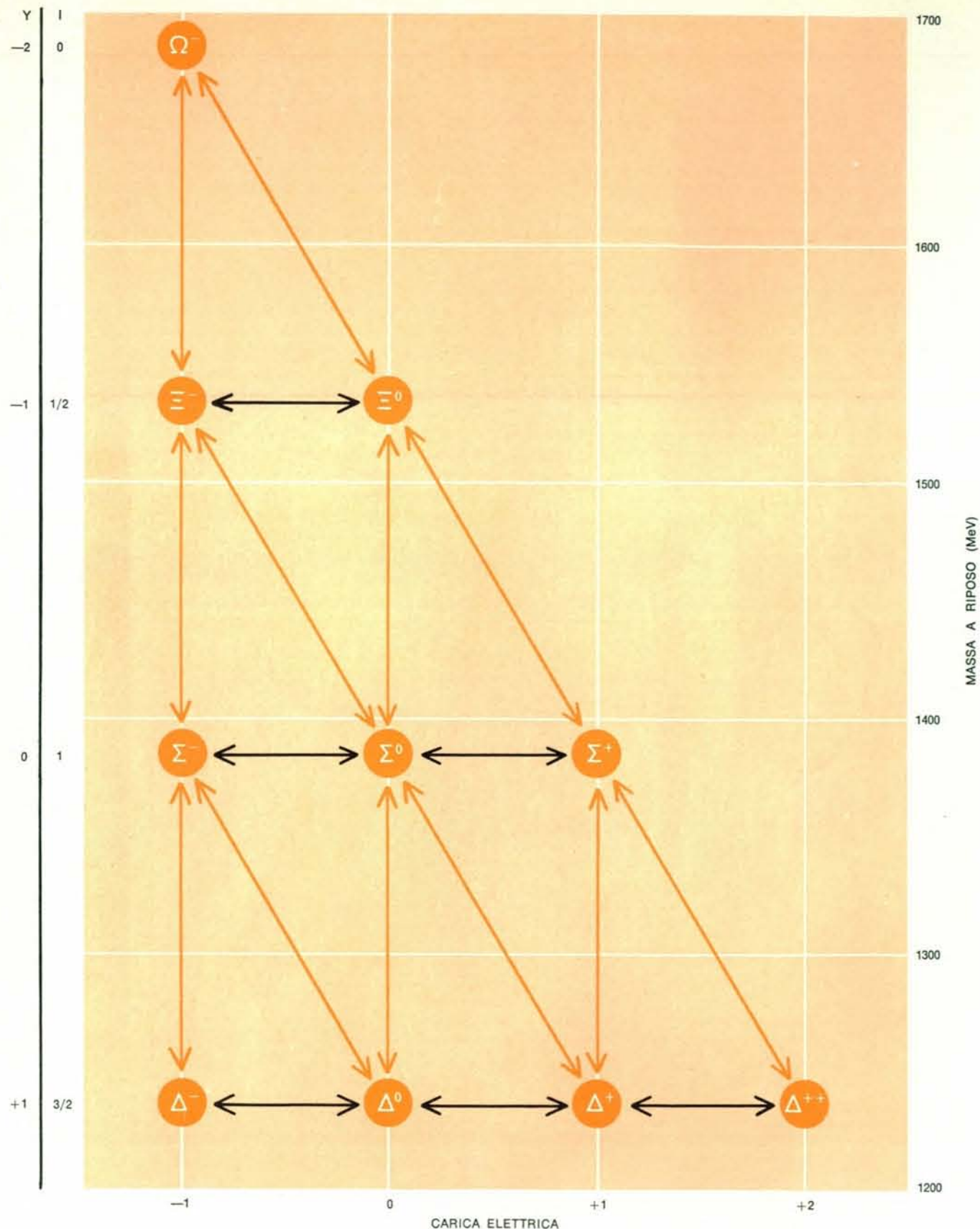
Uno dei problemi piú interessanti collegato all'importanza delle simmetrie nella fisica rimane però quello delle

TRASLAZIONE

ROTAZIONE

RIFLESSIONE

DILATAZIONE

PROIEZIONE

I diversi tipi di geometria vennero classificati da Felix Klein in base alle proprietà invarianti delle figure sottoposte a diversi gruppi di trasformazioni. La geometria euclidea è rappresentata in alto a sinistra come studio delle cosiddette proprietà metriche che risultano conservate quanto il quadrato *ABCD* è traslato, ruotato, riflesso o dilatato. La geometria affine, rappresentata a sinistra in basso, permette tutte queste trasformazioni e anche la proiezione mediante raggi paralleli su un piano comunque disposto. In quest'ultimo caso risultano mantenuti costanti i rapporti tra segmenti i cui estremi sono collineari. (Se *P* è un punto del segmento *AB*, allora il rapporto tra *AP* e *PB* non cambia quando la figura è trasformata.) In alto a destra è rappresentata la geometria proiettiva basata sulla proiezione di una figura da parte di una sorgente puntiforme su uno schermo comunque disposto. Una proprietà invariante delle figure proiettate in questo modo è il birapporto tra punti collineari. (Se *P* e *Q* sono due punti sul segmento *AB*, il rapporto *AP*/*PQ*:*AB*/*PB* non cambia durante la trasformazione.) La topologia, un quarto tipo di geometria che è rappresentato in centro a destra, studia le proprietà che si conservano durante le cosiddette deformazioni continue (piegature, torsioni, allargamenti). L'ordine dei punti è immutato dopo la deformazione. Nella teoria degli insiemi di punti, in basso a destra, l'ordine dei punti non è mantenuto durante la trasformazione chiamata « diffusione », ma i punti diffusi *rimangono* in corrispondenza con i punti della figura originaria. La teoria degli insiemi di punti può quindi essere considerata come lo studio delle proprietà che si conservano nelle corrispondenze biunivoche.

Il maggior successo dell'applicazione della teoria dei gruppi alla fisica delle particelle elementari è stata la scoperta della particella omega-meno (Ω^-) al Brookhaven National Laboratory. L'esistenza di questa particella era stata prevista in base alla « regola dell'otto », formulata indipendentemente da Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman e costituita da uno schema di classificazione basato sulla teoria dei gruppi astratti. Le teorie precedenti avevano dimostrato che la simmetria di « spin isotopico » (*frecce nere*) collega assieme famiglie di particelle aventi carica elettrica (Q) diversa. La regola dell'otto mette in causa un nuovo sistema di simmetria (*frecce colorate*) per raggruppare in superfamiglie le particelle aventi valori diversi dell'ipercarica (Y) e dello spin isotopico (I). Occorreva una particella con ben determinate caratteristiche per chiudere la superfamiglia di 10 membri dei quali ne erano noti solo 9: il quartetto delta (Δ), il tripletto sigma (Σ) e il doppietto xi (Ξ). La particella scoperta, oltre alle altre proprietà richieste aveva una massa che coincideva quasi perfettamente con quella prevista mediante la teoria.

orientazioni dello spazio geometrico e del tempo nel cronotopo.

Un principio generale di simmetria, ammesso sin dall'antichità, stabilisce che le leggi valide per una configurazione fisica dello spazio debbono risultare invarianti di fronte a ciascuna delle congruenze che mutano in sé la configurazione. Questo principio, del resto parzialmente implicito nella nozione stessa di simmetria, è stato per esempio impiegato indirettamente da Archimede – come già si è detto – e anche da Newton quando ritenne che la forza di attrazione che si esercita tra due masse puntiformi agisca lungo la retta che le congiunge.

Questo principio sembra però a prima vista venir contraddetto dalla legge di Ampère, in base alla quale un ago magnetico sospeso in un piano orizzontale viene ivi deviato (in un senso precisato dalla cosiddetta legge della mano destra) quando si faccia passare una corrente elettrica in un filo giacente con quello in uno stesso piano verticale. Il contrasto è però di fatto soltanto apparente, in quanto il magnetismo dell'ago è prodotto da correnti elettriche molecolari a questo coassiali, per cui (a un esame sufficientemente accurato) la configurazione in esame non risulta asimmetrica – come parrebbe – rispetto al suddetto piano verticale.

L'esperienza di Ampère sembra suggerire la possibilità di dotare il cronotopo di un orientamento spaziale intrinseco, ma ciò è legato alla possibilità di distinguere tra polo sud e polo nord nell'ago e tra elettricità positiva e negativa nel filo. La prima distinzione è ovviamente legata dal fatto che l'ago si trova sulla Terra e la seconda potrebbe mutarsi nell'opposta qualora si pensasse di trasportare il filo in un ipotetico universo in cui le antiparticelle assumessero la funzione che nel nostro sistema galattico hanno le particelle. Analoga argomentazione vale per l'orientazione spaziale fornita dall'esperienza di Lee e Yang sul cobalto-60, e si può dunque asserire che non si è trovato sinora – e forse non esiste – un mezzo intrinseco per scegliere nel cronotopo una delle due possibili orientazioni spaziali: in altri termini, le due orientazioni possibili sono perfettamente simmetriche.

Come ci si può facilmente attendere, le cose vanno in maniera assai diversa per ciò che concerne il tempo; per esso vale infatti la ben nota legge dell'entropia (o del decadimento universale) che assicura l'irreversibilità temporale dei processi naturali. Questa legge, confermata sperimentalmente nei singoli rami della fisica, è stata stabilita rigorosamente con argomentazioni probabilistiche basate sulla meccanica statistica e va accolta senza dubbi di sorta sia sul terreno pratico sia su quello teorico. Tuttavia, a detta di M. Smoluchowsky, non si può del tutto escludere che « se noi proseguissimo le nostre osservazioni per un tempo infinitamente lungo, tutti i processi risulterebbero irreversibili ». A questa affermazione si può attribuire un valore filosofico, ma non è manifestamente lecito darle alcun peso in campo scientifico.

Conclusione

La ricerca del vero induce l'uomo a porre alla base dei suoi studi una cosciente ricerca della semplicità. La natura si è però sovente dimostrata assai più complessa del previsto e non sembra che tentativi, anche recenti, di penetrare e unificare il sapere mediante un qualche « principio generale di semplicità » siano stati coronati da successo.

Anche se è vero che non di rado fattori riposti sono stati anticipati in base a semplici considerazioni estetiche, molto più spesso teorie fondate su vaghe analogie sorrette da criteri estetici si sono palesate tanto lontane dalla realtà e dal buon senso da lasciare i posteri stupiti e talora quasi increduli. Si pensi per esempio a Keplero che – prima di giungere alle leggi che portano il suo nome – aveva cercato di render conto delle distanze tra il Sole e i sei pianeti allora conosciuti (Saturno, Giove, Marte, Terra, Venere, e Mercurio) pensandoli disposti su sei sfere concentriche al Sole, alternativamente circoscritte e inscritte in poliedri regolari.

Il cammino verso la verità è assai spesso difficile, lento e tortuoso e va sempre accompagnato da opportune riserve e cautele. In esso i motivi estetici hanno sovente funzione di orientamento, ma i risultati che ne conseguono debbono venir assoggettati a controlli adeguati sul piano logico e su quello sperimentale.

Si può comunque asserire che la matematica è stata e sta sempre più diventando il mezzo per eccellenza atto ad approfondire lo studio delle simmetrie intese in senso lato. Si può inoltre presumere che dai continui progressi della matematica, e da una più diffusa e approfondita conoscenza di questa da parte dei non specialisti, dovrebbe a breve o lunga scadenza derivare un nuovo rigoglioso sviluppo nei più disparati rami dello scibile, e ciò non soltanto per quanto concerne le scienze fisiche e naturali e la tecnologia, ma altresì nei confronti dell'arte e, forse, perfino della filosofia.

ZANICHELLI

Metalli liquidi

Le loro proprietà liquide possono essere soddisfacentemente spiegate per mezzo della classica teoria cinetica della materia, ma quelle metalliche si spiegano solo con le piú moderne teorie quantistiche

di N.W. Ashcroft

Ognuno sa come liquefare un metallo: basta scaldarlo piú o meno ed esso si scioglie. Ma cosa significa dire che si è ottenuto un metallo liquido? Piú precisamente, in quale misura una sostanza come il mercurio (che si trova allo stato liquido a temperatura ambiente) si comporta come liquido e in quale come metallo?

Il fatto sorprendente è che fino a poco tempo fa è stata rivolta poca attenzione a quel particolare stato condensato della materia rappresentato dai metalli liquidi. Un congresso internazionale sulle proprietà dei metalli liquidi si è tenuto nel 1966 presso il Brookhaven National Laboratory: gli atti pubblicati superano le 600 pagine. Ora i metalli liquidi cominciano a suscitare un profondo interesse scientifico: sembra ragionevole chiedersi che cosa ci sia di cosí interessante in loro e quale sia attualmente il grado di conoscenza delle loro proprietà, sia liquide sia metalliche. Tenterò di fornire risposte chiare a queste domande.

Sarà dapprima necessario riferirsi a una serie di concetti generali che comprendono la struttura e la dinamica microscopica dei liquidi e la natura delle forze che agiscono tra i loro atomi o ioni. Quest'ultimo punto sarà esaminato con particolare riferimento alle proprietà degli elettroni « liberi » che caratterizzano molti metalli. Saremo quindi in grado di considerare le altre proprietà dei metalli liquidi che dipendono dai loro elettroni liberi. Confronteremo infine alcune semplici proprietà fisiche dei metalli liquidi con quelle di altri liquidi e di altri metalli.

Un metallo solido può essere approssimativamente definito come una sostanza opaca, malleabile, normalmente lucida, dotata di un'elevata conduttività termica ed elettrica. Questa generica descrizione si adatta certamente ai metalli liquidi anche se, eccetto per quanto riguarda la malleabilità, non si comportano sempre allo stesso modo dei metalli solidi. È interessante notare che esistono alcuni elementi che manifestano caratteristiche metalliche solo allo stato liquido. Per esempio il silicio e il germanio liquefatti sono metalli piuttosto buoni (quasi come il mercurio) mentre si comportano da semiconduttori quando sono allo stato cristallino. In totale sono classificati come metalli circa 70 elementi (*si veda la figura alle pagine 74 e 75*): tutti conservano proprietà metalliche quando sono liquefatti e lo stesso accade anche per leghe o miscele di molti di loro. Tutti sono caratterizzati in vario grado da un'alta concentrazione di elettroni di conduzione, a cui si devono di fatto le proprietà metalliche.

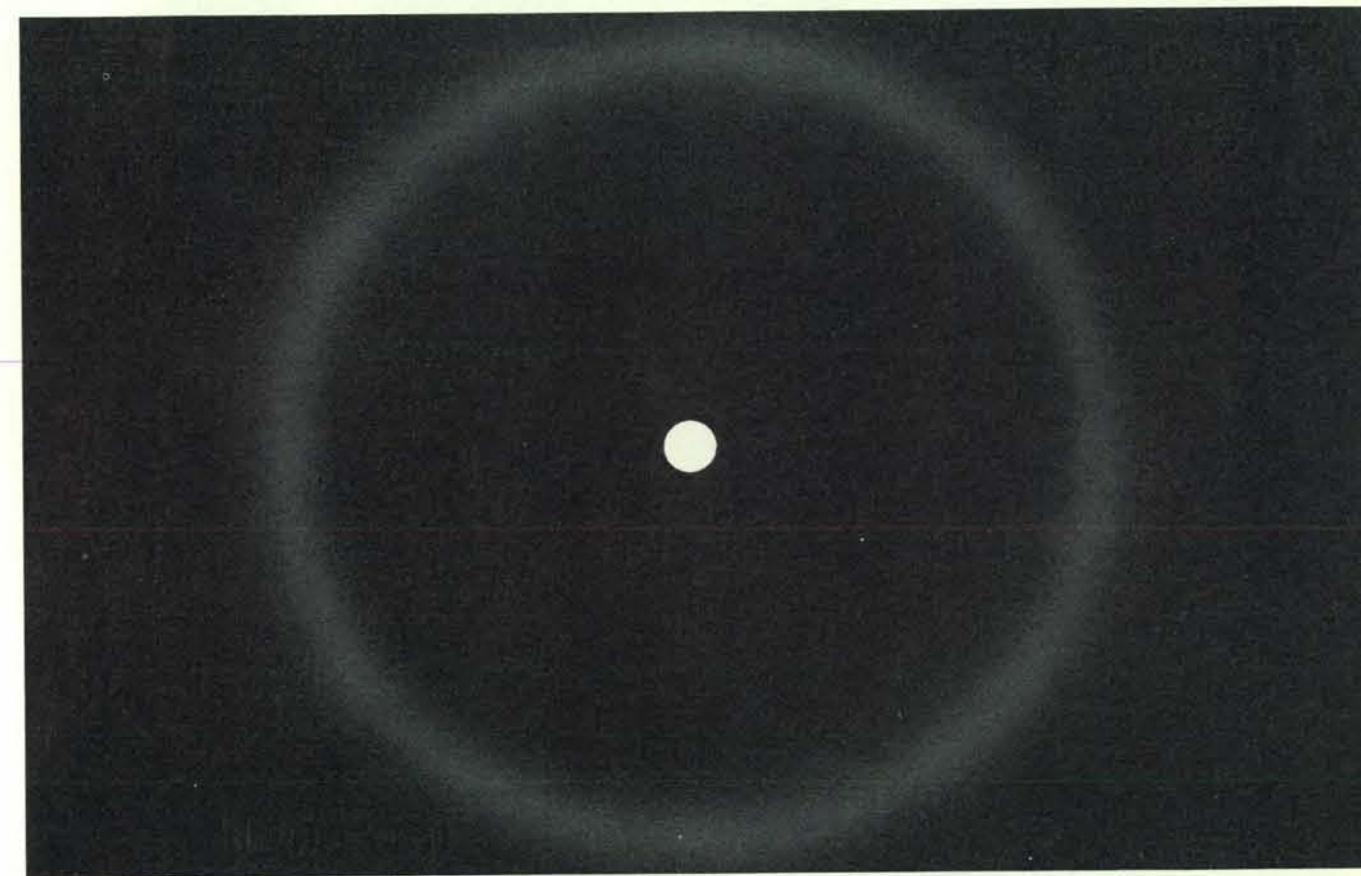
Forse la via piú semplice per cominciare a confrontare un metallo liquido con un liquido « normale » come l'acqua è quella di considerare la « densità numerica » delle loro particelle appena al di sopra dei relativi punti di fusione. A 4 gradi centigradi un centimetro cubo di acqua contiene circa $3,4 \times 10^{22}$ molecole; a $-38\,^{\circ}C$ la corrispondente densità numerica del mercurio (che è 13,6 volte piú denso dell'acqua) è $4,1 \times 10^{22}$ ioni al centimetro cubo. I due numeri sono notevolmente vicini, coincidenza che non è assolutamente limitata all'acqua e al mercurio. La relativa costanza della densità numerica della maggior parte dei liquidi è infatti un dato ben assodato e importante: da ciò si può immediatamente dedurre che in un liquido qualsiasi gli atomi distano mediamente tra di loro 2 o 3 angstrom. (Un angstrom è un centomilionesimo di centimetro.)

Poiché durante il processo di liquefazione si osserva di norma solo un piccolo cambiamento di volume (circa il 3 % o meno), se ne deduce che le densità numeriche dei solidi e dei liquidi dovrebbero essere piuttosto simili. Anche se accade proprio questo, le differenze strutturali tra solidi e liquidi sono notevoli. I metalli solidi tendono a cristallizzare con gli atomi mediamente disposti nei nodi di un reticolo tridimensionale (*si veda l'illustrazione in alto a sinistra a pag. 76*). Si è detto « mediamente » in quanto, persino a temperatura molto bassa, gli atomi di un solido vibrano intorno ai nodi del reticolo e l'ampiezza delle vibrazioni cresce con la temperatura.

Un metallo liquefatto perde l'ordine microscopico che aveva in precedenza: i suoi atomi non si muovono attorno a posizioni fisse nello spazio ma si spostano in modo apparentemente irregolare (*si veda la figura in alto a destra a pag. 76*). Gli atomi di un liquido non si muovono però indipendentemente dagli atomi vicini: il loro movimento è ostacolato da forti azioni interatomiche e è di natura « simpatica », intendendo con ciò il fatto che il moto di ogni atomo è influenzato dagli atomi vicini (e viceversa). Se avessimo un microscopio in grado di vedere gli atomi, la differenza tra i solidi e i liquidi apparirebbe molto chiaramente: in un campione di metallo solido la disposizione degli atomi risulterebbe altamente simmetrica, in un metallo liquido non sarebbe mediamente riscontrabile alcuna simmetria apparente.

Che cosa può dirci la teoria cinetica della materia intorno alle proprietà che ci si possono aspettare da una struttura cosí disordinata? Questa teoria, elaborata nel XIX secolo, ha avuto il suo maggior successo applicata ai gas, dove ancor oggi è utilizzabile con poche modifiche rispetto ai risultati originari. È stata anche applicata ai liquidi con vari gradi di successo e, come vedremo, è un'utile guida nel confron-

Confronto tra le figure di diffrazione dei raggi X prodotti da un campione di gallio appena al di sotto del punto di fusione (*in alto*) e appena al di sopra di questo (*in basso*). La struttura cristallina periodica del metallo solido è messa in evidenza dalla disposizione simmetrica dei punti nella figura in alto. La regolarità della struttura si perde nel cambiamento di fase da solido a liquido, e è sostituita nella foto sotto da un anello diffuso che indica l'andamento medio della simmetria sferica del liquido. La distribuzione dell'intensità può essere analizzata al fine di ottenere informazione sulla struttura media del metallo liquido. Le fotografie sono state fornite da Boris W. Batterman del Material Science Center della Cornell University.

to tra i metalli liquidi e gli altri liquidi.

I gas sono relativamente poco concentrati, avendo densità numeriche dell'ordine di 10^{19} particelle al cm^3; ciò significa che nei gas gli atomi sono in media 10 volte piú distanti tra di loro che nei liquidi. Il fatto che nei gas la distanza interatomica sia molto piú grande dei diametri degli atomi (che sono normalmente di un paio di angstrom) è alla base del successo della teoria cinetica dei gas.

I solidi cristallini si trovano all'altro estremo. Sappiamo che molte proprietà dei solidi sono descritte nel modo migliore dai concetti quantistici della meccanica ondulatoria. Il fatto che i solidi cristallizzino in reticoli regolari è stato un elemento fondamentale per il fortunato sviluppo delle teorie dello stato solido; la regolarità della struttura atomica è stata alla base, forse piú di ogni altra nozione, dei grandi sviluppi analitici compiuti nella fisica dei solidi in questi ultimi decenni.

Confrontata con la teoria cinetica dei gas e con la moderna teoria dello stato solido, l'attuale teoria dello stato liquido si trova ancora ai primissimi passi. Non ci sono principi assoluti e semplificatori confrontabili con quelli che derivano sia dalla relativa dispersione degli atomi in un gas sia dalla regolarità della struttura atomica in un solido. Sotto molti aspetti questa è la ragione per cui i metalli liquidi sono cosí interessanti. Presentano infatti al fisico problemi insoliti e stimolanti: come descrivere i sistemi densi e disordinati e come tener conto in essi delle proprietà degli elettroni liberi.

Allo scopo di farsi un'idea della complessità del primo di questi problemi consideriamo un'analogia con lo stato liquido. Supponiamo cioè che tutti gli abitanti del mondo (circa tre miliardi) si trovino riuniti in una zona piana di forma quadrata con un lato di circa 40 km. Sorprendentemente, si ha che ogni persona si troverebbe in media a un braccio di distanza dai suoi vicini. A ognuno è data una sola istruzione: di muoversi senza mai fermarsi, nel modo piú veloce possibile e in una qualsiasi direzione. Naturalmente il risultato sarà il caos. La gente si agiterà in modo disordinato tentando, senza riuscirci, di non urtarsi. Questo, prescindendo dalla mancanza di una terza dimensione, è grosso modo analogo al moto caotico di un gran numero di atomi in un liquido. Come si può studiare un moto di questo tipo?

Cominciamo con l'immaginare di fissare in una fotografia del liquido la posizione che i suoi atomi occupano in un certo istante: a ognuna di queste posizioni assegnamo un particolare vettore di posizione r, riferito a un'origine arbitraria (*si veda la figura a sinistra in basso a pag. 76*). I valori di questi vettori descrivono ciò che si può chiamare una configurazione del sistema. Proseguendo nel tempo notiamo che l'agitazione termica degli atomi fa continuamente variare la loro posizione. A quale velocità si muovono gli atomi? Considerazioni elementari, legate alle equazioni dell'energia cinetica e termica di un atomo, indicano che in media la velocità degli atomi in un liquido è grosso modo di 1000 metri al secondo. Come si è detto prima, questo moto non è libero e rettilineo, ma viene ostacolato dalla presenza degli atomi vicini. Ogni atomo (o ione nel caso di un metallo liquido) si muove in una « gabbia » formata dai suoi piú immediati vicini: il moto di ogni particella è simile a quello di un oscillatore armonico il cui centro (in questo caso il centro della gabbia) è in movimento (*si veda la figura in basso a destra nella pagina seguente*).

Possiamo immediatamente valutare le dimensioni della gabbia: questa deve avere un volume circa uguale a quello riservato a ogni atomo nel liquido, volume che si può dedurre facilmente dalla massa atomica, dalla densità del liquido e dal numero di Avogadro (il numero di molecole contenute in una grammomolecola del liquido). Per densità metalliche il raggio della gabbia è uguale a uno o due angstrom: questo significa che si può pensare che gli atomi oscillino nella gabbia a una frequenza di circa 10^{13} hertz. In altri termini, l'atomo ogni secondo tenta di cambiare la propria posizione 10^{13} volte.

Ci sono almeno due importanti conseguenze che derivano dalla linea logica precedente. La prima è relativa a un principio che interviene nella valutazione delle proprietà di ogni liquido, compresi i metalli liquidi. Supponiamo di effettuare una misura di una qualche proprietà del liquido, per esempio della sua resistività elettrica. Normalmente, la misura della resistività di un campione è relativa a una scala di tempo macroscopica (per esempio a tempi dell'ordine del secondo). Questa misura, confrontata con la scala di tempo delle oscillazioni atomiche (circa 10^{-13} secondi), richiede un enorme arco di tempo, durante il quale il liquido è passato attraverso un numero grandissimo di configurazioni diverse. In pratica si effettua una media dei movimenti degli ioni nel liquido e per molti versi sono queste « medie di configurazioni » che rendono possibile lo sviluppo nello studio dello stato liquido.

La seconda conseguenza della rapidità del movimento atomico nei liquidi è la tendenza dei vicini di un atomo (cioè degli atomi che formano la gabbia) a muoversi e a diffondersi. Il moto macroscopico degli atomi è un fenomeno osservabile nei liquidi, a differenza di quanto avviene nei solidi ove (eccetto che in tempi lunghissimi) tale moto è impedito dai legami del cristallo. Sebbene gli ioni ingabbiati abbiano circa 10^{13} possibilità di cambiare posizione ogni secondo si sa, per mezzo di esperimenti in cui fasci di neutroni sono diffratti da liquidi, che questi tentativi riescono una volta su 10. Ciò significa che per intervalli di tempo molto piccoli (dell'ordine di 10^{-13} secondi) gli ioni si trovano in posizioni momentaneamente fisse, attorno a cui oscillano poche volte prima di spostarsi. Adottando questa particolare scala di tempo si può parlare di un tipo di struttura geometrica del liquido. Tale struttura non è regolare, nel senso in cui un cristallo è regolare ma, come ha dimostrato il fisico inglese J.D. Bernal, nella pletora delle configurazioni geometriche si può scorgere un qualche tipo di ordine degli ioni. Naturalmente, su una scala di tempo molto piú lunga il quadro resta quello del caos atomico.

Uno dei requisiti della teoria cinetica a cui ora torniamo, consiste nel movimento disordinato degli atomi. Uno degli elementi di volta di questa teoria è il « cammino libero medio », un concetto introdotto per la prima volta nel 1857 da Rudolf Clausius per rappresentare lo spazio percorso in media dagli atomi tra due urti successivi (*si veda la figura a pag. 77*). In un gas l'urto viene considerato come un processo elastico, molto simile alla collisione tra due palle di biliardo (ma naturalmente nello spazio a 3 dimensioni). In un gas a pressione normale il cammino libero medio è di poche centinaia di angstrom, nei liquidi è di soli pochi angstrom. Per atomi sempre allineati uno rispetto all'altro il concetto di cammino libero medio perde parte della sua efficacia: tuttavia ci mette in grado di continuare il confronto fra le proprietà dei metalli liquidi e i comuni (o « classici ») liquidi isolanti.

Altri parametri importanti della teoria cinetica sono la densità numerica e la velocità quadratica media degli atomi. La prima, come si è visto, varia poco da liquido a liquido (e in realtà è grosso modo costante per tutto lo stato condensato); la velocità quadratica media può essere valutata attraverso l'energia termica degli atomi e dipende essenzialmente dalla massa atomica e dalla temperatura. Siamo cosí ricondotti in definitiva a calcolare il cammino libero medio degli atomi che dipende, per definizione, dalla natura degli urti degli atomi tra di loro.

Quando gli atomi vengono a collisione, entrano in gioco tra di loro forze di notevole intensità, che si rappresentano normalmente per mezzo della funzione che esprime l'energia potenziale. Si può supporre senz'altro che i liquidi, i cui atomi possiedono energia potenziale e densità simili, abbiano cammini liberi medi dello stesso tipo; come si è detto sopra, questo è un punto di partenza possibile e adatto a confrontare le proprietà dei metalli liquidi e degli altri liquidi. È però chiaro che per continuare il discorso è necessario esaminare piú da vicino i dettagli microscopici delle forze tra gli atomi e tra gli ioni e la loro influenza sulle proprietà macroscopiche.

Una delle manifestazioni di queste forze consiste nella «struttura media» del liquido, cioè nella proprietà del liquido che rispecchia in senso statistico la distribuzione atomica media misurata su una scala di tempo macroscopica. Ritornando all'immagine dell'affollato quadrato di 40 chilometri di lato ci poniamo due domande. Prima: quale è l'affollamento medio per metro quadrato? Seconda: qual è l'affollamento di un metro quadrato, misurato sempre a una certa distanza di una determinata persona? La risposta alla prima domanda è semplicemente la densità media di gente (circa una persona al metro quadrato); la risposta alla seconda (e la sua

PERIODO	GRUPPO I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	VIII	VIII	I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	GAS INERTI
1	1 H IDROGENO																	2 He ELIO
2	3 Li LITIO	4 Be BERILLIO											5 B BORO	6 C CARBONIO	7 N AZOTO	8 O OSSIGENO	9 F FLUORO	10 Ne NEO
3	11 Na SODIO	12 Mg MAGNESIO											13 Al ALLUMINIO	14 Si SILICIO	15 P FOSFORO	16 S ZOLFO	17 Cl CLORO	18 Ar ARGO
4	19 K POTASSIO	20 Ca CALCIO	21 Sc SCANDIO	22 Ti TITANIO	23 V VANADIO	24 Cr CROMO	25 Mn MANGANESE	26 Fe FERRO	27 Co COBALTO	28 Ni NICHEL	29 Cu RAME	30 Zn ZINCO	31 Ga GALLIO	32 Ge GERMANIO	33 As ARSENICO	34 Se SELENIO	35 Br BROMO	36 Kr CRIPTO
5	37 Rb RUBIDIO	38 Sr STRONZIO	39 Y ITTRIO	40 Zr ZIRCONIO	41 Nb NIOBIO	42 Mo MOLIBDENO	43 Tc TECNEZIO	44 Ru RUTENIO	45 Rh RODIO	46 Pd PALLADIO	47 Ag ARGENTO	48 Cd CADMIO	49 In INDIO	50 Sn STAGNO	51 Sb ANTIMONIO	52 Te TELLURIO	53 I IODIO	54 Xe XENO
6	55 Cs CESIO	56 Ba BARIO	57 La LANTANIO	72 Hf AFNIO	73 Ta TANTALIO	74 W WOLFRAMIO	75 Re RENIO	76 Os OSMIO	77 Ir IRIDIO	78 Pt PLATINO	79 Au ORO	80 Hg MERCURIO	81 Tl TALLIO	82 Pb PIOMBO	83 Bi BISMUTO	84 Po POLONIO	85 At ASTATO	86 Rn RADO
7	87 Fr FRANCIO	88 Ra RADIO	89 Ac ATTINIO															

6	58 Ce CERIO	59 Pr PRASEODIMIO	60 Nd NEODIMIO	61 Pm PROMEZIO	62 Sm SAMARIO	63 Eu EUROPIO	64 Gd GADOLINIO	65 Tb TERBIO	66 Dy DISPROSIO	67 Ho OLMIO	68 Er ERBIO	69 Tm TULIO	70 Yb ITTERBIO	71 Lu LUTEZIO
7	90 Th TORIO	91 Pa PROTOATTINIO	92 U URANIO	93 Np NETTUNIO	94 Pu PLUTONIO	95 Am AMERICIO	96 Cm CURIO	97 Bk BERCHELIO	98 Cf CALIFORNIO	99 Es EINSTEINIO	100 Fm FERMIO	101 Md MENDELEVIO	102 No NOBELIO	103 Lw LAURENZIO

La maggior parte degli elementi sono metalli che, a pressione e a temperatura normali, si trovano allo stato solido, come risulta indicato dai quadrati di colore leggero in questa tavola periodica. Le caselle di colore scuro denotano invece quei pochi elementi che diventano metallici solo se vengono fusi. Inoltre, certi altri elementi (per esempio l'idrogeno, il fosforo e il boro) possono divenire metallici ad alte pressioni. Ogni elemento è caratterizzato in questa tabella mediante il suo nome, il suo simbolo e il suo numero atomico. (Quest'ultimo corrisponde al numero di cariche positive del nucleo, o al numero degli elettroni periferici.)

applicazione ai liquidi reali) è piú complicata e interessante.

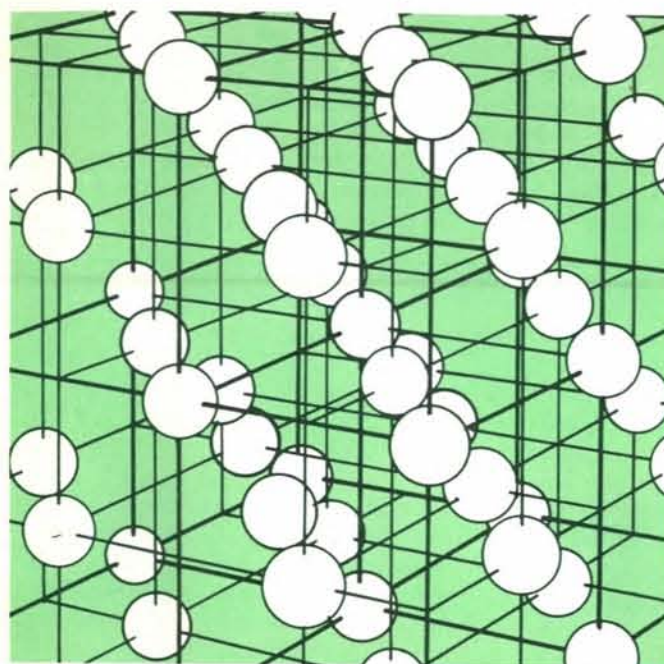
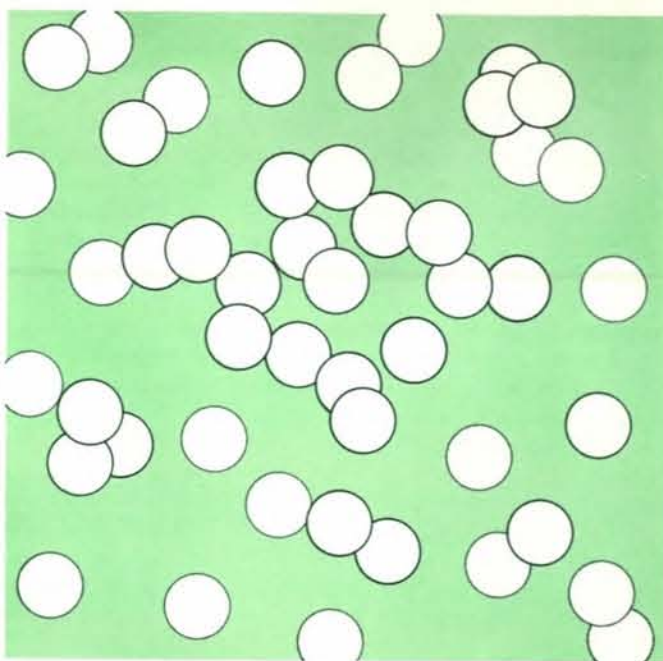
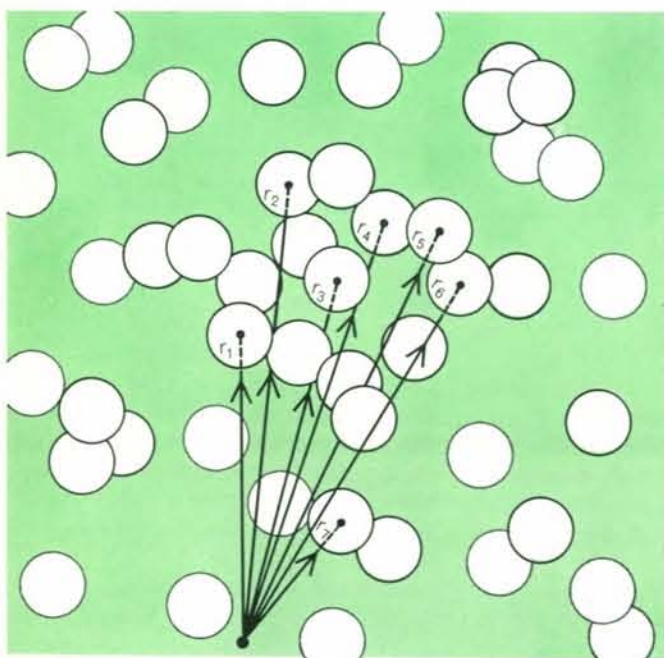
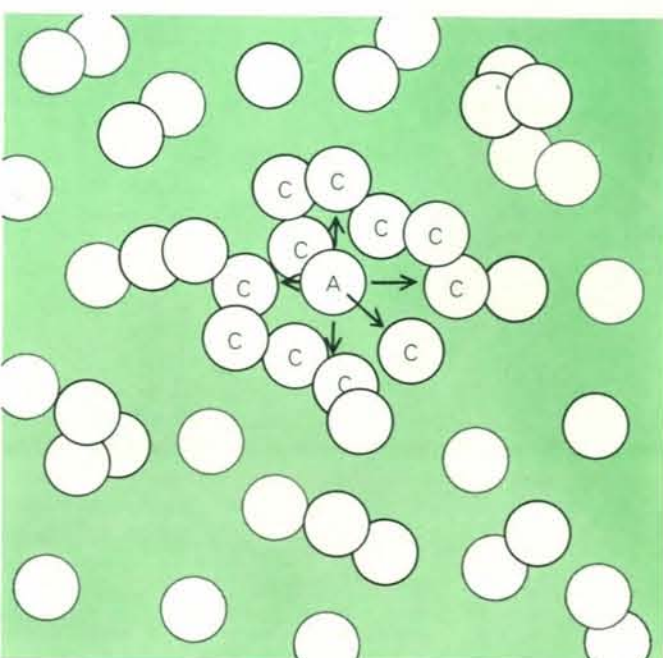
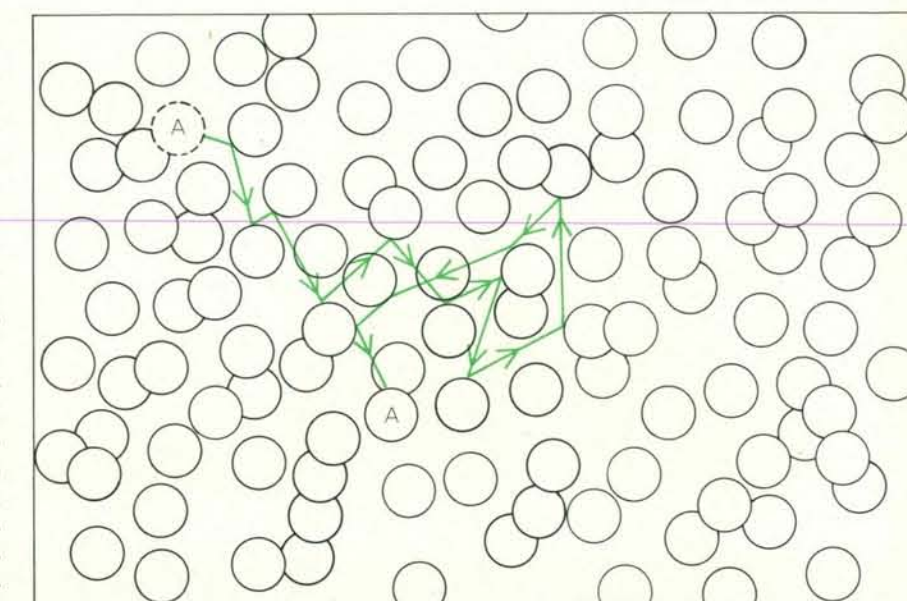
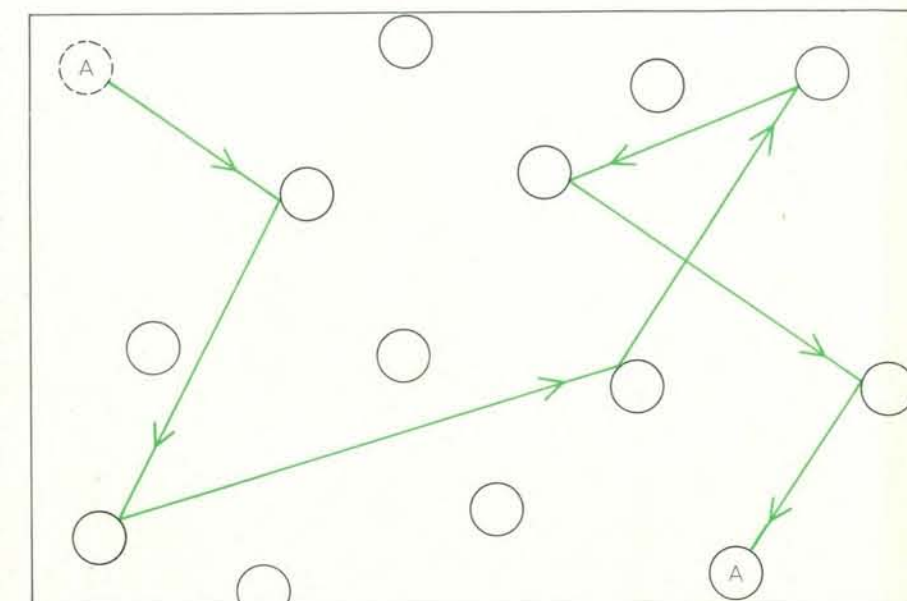
La determinazione della disposizione media degli atomi nello stato liquido è un difficile problema di meccanica statistica. D'altra parte alcuni degli elementi fisici che intervengono nel problema non sono di difficile comprensione. In molti sistemi liquidi la forza totale agente su un atomo può essere considerata semplicemente come la somma di tutte le azioni possibili esercitate su esso dagli altri atomi, sia vicini sia lontani. La dinamica di un dato liquido è dovuta a queste forze e è studiata dalla meccanica statistica.

Un metodo normale e molto efficace adottato per studiare la struttura dei liquidi classici consiste nell'usare un calcolatore elettronico programmato in modo tale da simulare un piccolo numero di particelle poste in una scatola e tra le quali agisce una forza, e nello studiare l'evoluzione nel tempo del sistema tenendo conto delle leggi della meccanica newtoniana. Si possono calcolare la posizione e la velocità in ogni istante; in particolare si può chiedere alla macchina di valutare la probabilità, riferita alla media delle configurazioni, di avere una particella a una determinata distanza da un'altra. Questa probabilità può essere descritta da una funzione di distribuzione radiale $g(r)$. Si ottiene qualcosa di simile a una mappa che dà la densità di particelle che circondano la particella considerata.

La funzione di distribuzione radiale è molto importante nella teoria microscopica dei liquidi e nella teoria degli stati elettronici dei metalli liquidi in quanto rispecchia chiaramente la disposizione media strutturale degli atomi e in definitiva le forze che si esercitano tra questi. Si pone naturalmente una domanda: esiste un qualche modo per studiare sperimentalmente la struttura dei liquidi e dei metalli liquidi? Se questo metodo esiste, ne deriva la possibilità di risalire dall'esperimento alla comprensione della natura delle forze interatomiche. La risposta alla domanda è naturalmente positiva: per circa 50 anni sono state impiegate tecniche basate sulla diffrazione dei raggi X, ottenendo notevoli successi nello studio della materia, soprattutto per quanto riguarda la determinazione della struttura dei solidi cristallini. Le lunghezze d'onda dei raggi X sono dell'ordine di pochi angstrom e poiché nei solidi la distanza tra gli atomi è dello stesso ordine di grandezza, i raggi X subiscono una notevole e caratteristica diffrazione a opera degli atomi. Oltre al fatto che i raggi X sono deviati dagli elettroni degli atomi, non ci è necessario sapere molto di piú sulla natura del fenomeno. L'interesse si concentra sulla figura di diffrazione che è possibile studiare su una lastra fotografica o su uno schermo: una disposizione simmetrica di punti che è caratteristica della struttura del solido (*si veda la figura in alto a pag. 73*).

Ma i raggi X sono fortemente diffratti anche dai liquidi: le immagini ottenute sono però radicalmente diverse. Durante il tempo macroscopico che è necessario per ottenere la figura di diffrazione, gli atomi del liquido hanno mutato la propria posizione un numero infinito di volte: ciò che vediamo corrisponde a uno stato medio del sistema. Tuttavia le proprietà del liquido non dipendono « in media » dalla scelta della direzione: il sistema è dotato di simmetria sferica e è questa che è rispecchiata nella figura di diffrazione ottenuta con i raggi X (*si veda la figura in basso a pag. 73*).

È possibile tradurre in grafico (in funzione dell'angolo di diffrazione) l'andamento dell' intensità, lungo una linea di macchie a partire dal centro per un solido e lungo un qualsiasi raggio per un liquido (*si veda la figura nella pagina seguente*). Quando si confrontano questi risultati appare evidente che i massimi relativi alla figura di diffrazione del liquido corrispondono in un certo modo alle macchie del solido. Si nota tuttavia che la figura media di interferenza dei raggi X dispersi dai liquidi dipende sensibilmente dalla distanza relativa dei centri diffusori: questa importante dipendenza è stata rilevata per la prima volta nel 1915 da Peter J.W. Debye.

È abbastanza ovvio che, essendo la diffrazione dei raggi X dovuta agli elettroni, i modelli ottenuti devono anche rispecchiare in qualche maniera la distribuzione di questi elettroni all'interno degli atomi e fra gli atomi stessi. Ragionando in un altro modo, supponiamo di avere due liquidi ipotetici nei quali le forze interatomiche siano le stesse. Da quanto detto finora risulta

Il metallo solido è caratterizzato da un reticolo cristallino tridimensionale regolare. La struttura qui riportata è cubica a facce centrate, con gli ioni che occupano in media i vertici e il centro di ogni faccia. Nella maggior parte dei metalli solidi lo spazio tra gli ioni è occupato da elettroni liberi (*colore*).

Il metallo liquido non mostra traccia dell'originario ordine microscopico. Gli ioni non si trovano in posizioni fisse nello spazio, ma si muovono apparentemente a caso, vincolati solo dalle forze interatomiche. Come nel caso precedente, nella parte non occupata dagli ioni si trovano gli elettroni liberi (*colore*).

Una fotografia immaginaria della struttura atomica istantanea di un metallo liquido mostrerebbe le posizioni degli ioni misurate da un'origine arbitraria fissa nello spazio. I vettori di posizione sono indicati con r_1, r_2, ecc. Il complesso dei vettori in un dato istante costituisce una configurazione del sistema.

In un metallo liquido gli ioni vicini formano una « gabbia » in cui lo ione centrale è in rapida vibrazione. (Lo ione centrale a sua volta fa parte delle gabbie dei suoi vicini.) La frequenza è cosí alta che gli ioni hanno circa 10^{13} probabilità al secondo di cambiare posizione. Solo il 10 % di questi tentativi riesce.

Il concetto di cammino libero medio è usato nella teoria cinetica per descrivere la distanza media percorsa dagli atomi fra due urti successivi. In un gas (*in alto*) tale cammino può essere di centinaia di angstrom o maggiore, a seconda delle dimensioni dell'atomo stesso. In un liquido (*in basso*) il cammino medio libero è di pochi angstrom.

che a parità di temperatura la struttura media dei due liquidi è la stessa. Supponiamo ora che la struttura elettronica degli atomi dei due liquidi sia diversa; è diversa allora la capacità di diffondere i raggi X e quindi i due diagrammi di intensità non saranno uguali. Ogni diagramma contiene informazioni sulla struttura del liquido e informazioni sulla distribuzione degli elettroni. Infatti il diagramma risultante è una combinazione molto semplice di questi due fattori. Per mezzo di considerazioni di meccanica quantistica è possibile calcolare la distribuzione degli elettroni che, associata ai risultati sperimentali, permette di risalire alla struttura del liquido. Per studiare la struttura dei liquidi può anche essere utilizzata la diffrazione dei neutroni

L'intensità dei raggi X diffratti da un solido può essere analizzata lungo la linea di punti che si dipartono dal centro della figura (*in alto*), mentre per un liquido può essere analizzata lungo ogni raggio (*in basso*). I massimi della figura ottenuta dal liquido corrispondono ai picchi della figura ottenuta dal solido. Il massimo assoluto del liquido corrisponde all'anello più brillante nella fotografia a raggi X in basso a pagina 73. La curva tratteggiata nella figura inferiore riassume le informazioni sulla distribuzione degli elettroni negli atomi. Si può avere un discreto quadro della struttura del campione in esame dividendo la curva a tratto pieno per quella tratteggiata.

lenti e recenti risultati ottenuti sia con i raggi X sia con i neutroni mostrano nell'insieme un soddisfacente accordo tra i due metodi.

Le informazioni sulla struttura media dei liquidi contenute nelle figure di diffrazione sono legate alla funzione di distribuzione radiale per mezzo di una semplice trasformazione matematica; di conseguenza, disponendo di sufficienti notizie sperimentali, è possibile calcolare numericamente tale funzione. Il passo fondamentale è questo: con le leggi della meccanica statistica si possono determinare in via approssimativa le equazioni che correlano $g(r)$ alle forze tra le particelle. Dalle informazioni fondamentali ottenute dalla diffrazione è possibile dedurre, benché con notevoli difficoltà numeriche, le forze interatomiche e interioniche (e i loro potenziali).

Anche se persistono tuttora delle difficoltà nel formulare teorie che colleghino i dati sulla densità alle forze, i potenziali calcolati teoricamente non sono molto diversi da quelli ottenuti dagli esperimenti. Una di queste curve di potenziale, ricavata sperimentalmente per il sodio liquido, è riportata nella pagina a fronte. Si noti che questa mostra alcune singolari caratteristiche, specie se la si confronta con la curva dell'argo liquido riportata nella stessa pagina. Le due curve sono molto simili: ambedue hanno una forte pendenza per piccole distanze fra le particelle. Per il potenziale argo-argo, l'origine fisica di questa zona (che corrisponde a una forte repulsione) è ben nota: l'argo, in quanto è un elemento inerte, ha una configurazione elettronica formata da « gusci chiusi » *(si veda la figura a pag. 80)*. Il guscio esterno di questo atomo è completo, a differenza di quanto accade per gli atomi dei metalli, e non può quindi accettare altri elettroni. Supponiamo tuttavia di tentare di avvicinare l'uno all'altro due atomi di argo in modo da porre a contatto i loro gusci esterni. In virtù del principio di esclusione di Pauli i gusci esterni, essendo completi, non sono in grado di ricevere nessuno degli elettroni che noi vorremmo imporre loro. Inevitabilmente, come unica possibilità, gli elettroni tendono a cercare delle zone libere in cui disporsi, zone che sono naturalmente a un livello di energia molto piú elevato. In altre parole, la sovrapposizione forzata delle orbite esterne complete si traduce in un gran dispendio di energia e ne risulta quindi un'azione fortemente repulsiva. Ragionando in termini di potenziale si può dire che quando la distanza tra gli atomi diviene dell'ordine delle dimensioni atomiche l'energia potenziale aumenta con notevole rapidità come si verifica quando si spingono una contro l'altra due sfere rigide elastiche.

A grandi distanze, la forza che si esercita tra due atomi di argo è attrattiva. Anche la ragione di questo comportamento è ben nota: le cariche di un atomo tendono a influenzare quelle dell'altro. In ogni istante ciò provoca un allontanamento dei centri di carica positiva (i nuclei) da quelli di carica negativa (gli elettroni), centri che normalmente coincidono negli atomi neutri e isolati. Cariche leggermente separate costituiscono un dipolo elettrico e due dipoli (come quelli che si hanno in una coppia di atomi) possono attrarsi reciprocamente. Considerazioni elementari sull'effetto dei « dipoli fluttuanti » spiegano la parte della curva classica dell'energia potenziale per l'argo corrispondente a grandi distanze. È importante sottolineare ancora che la parte che si riferisce alle piccole distanze è estremamente ripida. Inoltre, il fatto che gli atomi di argo risultino quasi inaccessibili uno rispetto all'altro e che l'effetto del dipolo fluttuante si riveli piuttosto piccolo, suggerisce che il criterio largamente impiegato di considerare gli atomi come semplici sfere rigide (come avviene nella teoria cinetica) è un'approssimazione ragionevole.

Evidentemente, la curva del potenziale ione-ione per un metallo è di forma simile a quella per atomi neutri in un liquido classico. Ma perché questo accade? Per rispondere è necessario cominciare ad analizzare lo stato metallico piú da vicino. Qual è la caratteristica dei metalli che li distingue dagli altri stati della materia? Ovviamente è il fatto che gli elettroni di valenza esterni degli atomi metallici sono quasi completamente liberi quando gli atomi si trovano nello stato condensato: tutti gli elettroni di valenza, in origine scarsamente legati, appartengono in un certo senso a tutti gli ioni. Sappiamo anche che la distribuzione degli elettroni in alcuni metalli è fortemente influenzata dalle interazioni fra gli elettroni o fra gli elettroni e gli ioni positivi che hanno abbandonato. Questi metalli sono chiamati spesso « metalli con elettroni quasi liberi ». Poiché per via sperimentale si trova che la densità del metallo liquido differisce solo per pochi per cento da quella del solido, non sarebbe irragionevole pensare che la distribuzione degli elettroni nel metallo liquido non sia enormemente diversa dalla distribuzione che si ha nel solido. Anche se è difficile giustificare teoricamente questo punto lo si è potuto confermare sperimentalmente per mezzo di studi sulla produzione dei raggi X sia nei solidi sia nei metalli liquidi.

Uno dei primi problemi che si presentano consiste nel valutare le forze agenti tra due ioni positivi, in presenza di un'alta densità di elettroni di conduzione macroscopicamente uniformi. Gli elettroni possiedono una spiccata attitudine a rispondere alle forze applicate, per esempio ai campi elettrici. Quando delle cariche in un sistema neutro sono sottoposte a un campo elettrico si ha una polarizzazione interna, cioè una separazione delle cariche, che contribuisce alla costante dielettrica. Nel caso ipotetico in cui tutte le cariche non potessero reagire alle forze applicate dovremmo attenderci una costante dielettrica unitaria, come si ha nel vuoto. Si sa anche che all'interno del mezzo il campo applicato è modificato dalla costante dielettrica che solo nei mezzi continui e omogenei è in realtà una vera costante. Non cosí

Confronto tra le curve di energia potenziale per due atomi neutri di argo (*in alto*) e due ioni positivi di sodio (*in basso*). Per piccole distanze tra le particelle ambedue le curve presentano una ripida pendenza che corrisponde a una forte repulsione. Per l'argo, un liquido « classico », l'inizio della zona fortemente repulsiva si ha grosso modo in corrispondenza della minima distanza tra gli atomi. Per il sodio, un metallo liquido, la zona repulsiva è maggiore del diametro dello ione. Per distanze maggiori le funzioni di potenziale per ambedue i liquidi hanno solo piccole zone attrattive.

in un metallo. Consideriamo il campo attorno a una carica positiva q posseduta da uno ione che in assenza di un qualsiasi gas elettronico (o in presenza di un gas elettronico « congelato ») produce, secondo la legge di Coulomb, un'energia potenziale $-qe/r$ a una distanza r, dove $-e$ è la carica dell'elettrone (*si veda la parte « a » della figura a fronte*). Introducendo gli elettroni (o « sgelandoli », se sono già presenti) si ha la situazione seguente: gli elettroni vicini alla carica reagiscono prontamente e convergono su di essa.

Nel far ciò gli elettroni creano attorno al centro di potenziale uno schermo di cariche negative, cosicché gli elettroni piú lontani risentono di una carica complessiva minore e reagiscono quindi in modo meno pronto. Quando il sistema si stabilizza il risultato è una distribuzione non uniforme di cariche negative attorno allo ione (*si veda la parte « b » della figura a fronte*). Ne consegue che la « costante dielettrica » del mezzo è di fatto non costante.

Supponiamo ora di fissare l'attenzione su uno degli ioni circondato da uno schermo di elettroni. Introduciamo un secondo ione, che tende anch'esso ad attirare elettroni: nel discutere le forze che agiscono tra i due ioni dobbiamo tenere conto dell'interazione dei due ioni positivi, ognuno con un mantello di cariche negative (*si veda la parte « c » della figura a fronte*). Anche se non si può continuare a lungo l'analogia, può essere talvolta utile vedere questo fenomeno di nuovo in termini di interazione dell'atomo con gli elettroni nello schermo circostante piuttosto che con il suo compagno di viaggio. Abbiamo già osservato che nei liquidi classici ciò può portare a curve di potenziale ripide; conclusioni analoghe possono essere tratte per gli ioni con le loro nuvole elettroniche circostanti. Inoltre, in certe condizioni, si possono anche trovare zone attrattive (negative) nel potenziale.

Il risultato complessivo è un potenziale ione-ione con una zona interna repulsiva e una esterna che per alcuni metalli è attrattiva. È chiaro però che la parte repulsiva del potenziale riguarda in maggiore misura la carica elettronica esterna e non nasce necessariamente dalla restante barriera interna di elettroni dello ione stesso. Questa affermazione deve essere limitata per due motivi. In primo luogo per densità sufficientemente elevate (o per piccole distanze fra gli ioni) si deve in definitiva considerare questa zona come si è fatto nel caso del potenziale argo-argo, ma per densità normali, nei metalli con elettroni quasi liberi, la parte rigida è dovuta agli elettroni di conduzione. In secondo luogo esistono alcuni metalli, come i metalli di transizione che si trovano nel centro della tavola periodica, che possiedono fondamentalmente due « classi » di stati elettronici: 1) quelli per i quali gli elettroni sono diffusi in tutto il campione e sono essenzialmente simili alla situazione fisica che abbiamo descritto; 2) quelli che, benché non esattamente simili agli stati elettronici negli atomi, sono molto piú localizzati attorno agli ioni di quanto lo siano gli elettroni liberi. Per questi metalli risulta che i potenziali ione-ione sono di nuovo dominati dall'equivalente delle interazioni tra i gusci (gli schermi) e le loro curve di potenziale ricordano quella del tipo argo-argo.

Nell'argo liquido la parte fortemente repulsiva nella curva dell'energia potenziale corrisponde al fatto che l'argo liquido, essendo un elemento inerte, ha una configurazione elettronica formata da « gusci chiusi » (*in alto*). La numerazione delle orbite elettroniche complete deriva dalla terminologia spettroscopica. Quando due di questi atomi sono forzati a unirsi in modo che le orbite esterne si sovrappongano (*in basso*) tali orbite non possono ricevere alcun elettrone in piú. Quindi gli elettroni cercano delle zone vuote che si trovano a energie maggiori. Il risultato è una azione fortemente repulsiva, analoga a quella che si ha spingendo due sfere rigide una contro l'altra.

Per i metalli con elettroni quasi liberi la zona repulsiva è tuttavia di un angstrom piú lontana di quanto le dimensioni della sfera interna dello schermo elettronico farebbero pensare. La ragione di ciò si trova nelle dimensioni della carica elettronica raggruppata intorno allo ione positivo. Queste dimensioni sono all'incirca di un angstrom cosicché nei metalli liquidi la dimensione effettiva di uno ione con i suoi elettroni-schermo è ragionevolmente vicina a quella di un atomo metallico libero con i suoi elettroni di valenza dei gusci esterni.

Da tutto questo si può trarre una conclusione importante. Poiché le dimensioni degli atomi della tavola periodica non differiscono grosso modo in misura notevole, ne segue che le corrispondenti probabilità dei loro scontri non variano in misura sostanziale. Si può ora vedere come i cammini liberi medi usati nella teoria cinetica dovrebbero variare solo di poco passando dai liquidi isolanti classici ai metalli liquidi. Inoltre, tenuto conto delle differenze di massa atomica e di temperatura, le proprietà fondamentali normalmente proprie dei liquidi (come la viscosità, la tensione superficiale e la diffusione) dovrebbero essere comparabili entro piccoli intervalli numerici. Questo si verifica spesso in realtà e per quanto riguarda queste proprietà i metalli liquidi non sono affatto anormali. Differenze notevoli tra i metalli liquidi e gli altri liquidi si riscontrano in proprietà come la conduttività elettrica e termica, il comportamento ottico e la compressibilità, che sono tutte univocamente legate alle caratteristiche specifiche del metallo liquido.

Prescindendo dall'ovvio cambiamento di stato, quali sono le differenze tra metallo liquido e metallo solido? Una risposta dettagliata dipende naturalmente dalle proprietà che si vogliono confrontare, ma l'impressione globale è che le differenze non sono grandi. Prendiamo come esempio il cambiamento nella resistività elettrica. Nel liquefarsi la resistività del gallio aumenta di circa un fattore due, variazione niente affatto clamorosa, e circa lo stesso si verifica per il mercurio e il sodio.

Ora, la corrente elettrica nei metalli è portata principalmente dagli elettroni liberi che si muovono per effetto delle forze elettromagnetiche applicate o dei gradienti di temperatura. Se non ci fossero ostacoli a impedire questo moto la resistenza sarebbe nulla: ciò non si verifica e sembra che gli elettroni si aprano la strada attraverso un denso

Nel sodio liquido la parte fortemente repulsiva della curva di energia potenziale nasce dalla distribuzione non uniforme degli elettroni « liberi » intorno ai due ioni vicini. Questi « gusci » elettronici sono costituiti di elettroni che si sono staccati dalle orbite di valenza esterne degli ioni. Il disegno a sinistra in *a* mostra una carica positiva *q* su uno ione immerso in una distribuzione di cariche elettroniche « congelate »: questa situazione si esprime in un campo di potenziale che è rappresentato dalla curva di destra in *a*. Il disegno a sinistra in *b* mostra la stessa carica positiva *q* immersa in una distribuzione « sgelata » di elettroni che ora sono liberi di rispondere al suo campo di potenziale. Gli elettroni si addensano intorno a *q* producendo il campo non uniforme di potenziale descritto nella curva a destra in *b*. Il disegno a sinistra in *c* mostra due ioni vicini con i loro gusci di elettroni in contatto. La curva a destra in *c* mostra che questi gusci hanno effetti simili a quelli delle orbite elettroniche degli atomi.

Confronto tra i cammini liberi medi degli elettroni nei metalli liquidi e solidi. Ad alte temperature la resistenza nei metalli puri è essenzialmente dovuta ai grandi cammini medi delle vibrazioni ioniche. A basse temperature, tali vibrazioni diminuiscono e altre imperfezioni cominciano a influenzare la resistività. Nei metalli liquidi gli elettroni sono deviati dalla distribuzione disordinata degli ioni. Vicino al punto di fusione la capacità di deviare gli elettroni di conduzione è però simile.

insieme di ioni i cui campi elettrici li deviano e li disperdono. In un metallo liquido gli elettroni sono soggetti a urti con gli ioni; rifacendosi alle nostre conoscenze sulla teoria cinetica sembra sensato tentare di descrivere la dispersione degli elettroni mediante il concetto di cammino libero medio. Intuitivamente si sarebbe tentati di pensare che lo spazio fra due urti successivi subiti da un elettrone sia qualche cosa di analogo alla distanza tra i centri di deviazione, cioè a due o tre angstrom. In molti metalli questo è però inesatto, in quanto il cammino medio libero dedotto dalla loro resistività è molto maggiore.

Conoscendo la storia della fisica dei metalli ci si rende conto come questa difficoltà abbia un aspetto familiare. È precisamente il problema incontrato dai fisici negli anni venti nel tentativo di spiegare la resistività dei metalli. Se a quei tempi fossero state realizzabili temperature estremamente basse e cristalli metallici perfetti, sarebbero stati scoperti cammini liberi medi per gli elettroni dell'ordine di 10 milioni di volte le distanze reticolari! Questo problema è stato finalmente risolto con l'uso della meccanica ondulatoria che prevede che gli elettroni rappresentati dalle onde non siano affatto deviati da atomi disposti in solidi perfettamente cristallini. Le onde elettroniche sono deviate solo leggermente dagli ioni di qualche metallo liquido. In questo contesto è molto istruttivo confrontare i cammini liberi medi degli elettroni nei metalli liquidi e solidi (*si veda la figura in questa pagina*).

Ad alte temperature la differenza rispetto alle condizioni ideali (sotto forma di vibrazioni degli ioni che aumentano con la temperatura) è la causa fondamentale della resistenza in metalli che peraltro sono perfettamente cristallini. A bassa temperatura le vibrazioni degli ioni diminuiscono e altre imperfezioni (come la presenza di impurità o difetti cristallini) cominciano a influenzare la resistività. Questo fenomeno si manifesta col fatto che metalli di purezza variabile hanno circa la stessa resistività a temperatura ambiente mentre si hanno notevoli differenze a bassa temperatura.

In un metallo liquido gli elettroni sono deviati dalla disposizione disordinata degli ioni. In prossimità del punto di fusione però, la capacità dei metalli sia liquidi sia solidi di deviare le onde elettroniche ridiviene paragonabile, e in quelli liquidi è circa il doppio. Inoltre, i fisici cominciano a capire ora non solo perché i metalli liquidi sono conduttori, ma perché sono conduttori tanto buoni. Durante questi ultimi anni, John M. Ziman dell'Università di Bristol ha sviluppato una teoria relativamente semplice sulla resistività dei metalli liquidi tenendo conto solo della struttura media degli ioni (ricavabile dalle esperienze) e della deviazione degli elettroni da parte degli ioni isolati (ricavabile dalle conoscenze sui metalli solidi). Questo metodo ha riportato notevole successo e ha spinto altri a sviluppare e a estendere le sue idee fondamentali.

Uno sviluppo nuovo ed emozionante consiste nello studio degli effetti che i cambiamenti di fase che stanno per avvenire e la separazione delle fasi hanno sulle proprietà di trasporto dei metalli e delle leghe liquide. Si sa che i metalli solidificano in genere quando sono raffreddati al di sotto dei loro punti di fusione; si sa anche che alcuni miscugli di metalli sono completamente miscibili al di sopra di certe temperature e immiscibili al di sotto. Appena prima che si manifestino queste trasformazioni gli ioni devono cominciare a mostrare « fluttuazioni critiche » nel loro movimento, cioè moti che rispecchino l'inizio del cambiamento di fase. Come risultato, anche i fenomeni di trasporto devono mostrare effetti simili; questi « fenomeni critici » si stanno dimostrando un interessante campo di studio nello stato cristallino liquido.

La spiegazione delle proprietà di trasporto dei metalli liquidi mette in luce una differenza sostanziale tra le proprietà metalliche e liquide. Si può tener conto abbastanza bene delle proprietà liquide con i metodi della fisica classica, ma per spiegare le proprietà metalliche è necessario ricorrere alla teoria dei quanti. Questa necessità permane anche per i metalli i cui cammini liberi medi risultano di 2 o 3 angstrom. Questo problema particolare – la natura e la distribuzione degli stati elettronici in sistemi fortemente disperdenti – è uno di quelli in cui sono più intensi gli studi teorici.

Come è difficile comprimere i metalli solidi, tanto è difficile comprimere i metalli liquidi e per i medesimi motivi. Infatti, riducendo in ambedue i casi lo spazio, si tenta di ammassare gli elettroni liberi in uno spazio minore: gli elettroni contrastano questo sforzo perché grandi quantità di elettroni costretti in un piccolo spazio tendono ad avere notevoli energie cinetiche che aumentano con l'aumentare della densità. I metalli liquidi sono pertanto molto più incompressibili degli altri liquidi: da questo fatto segue direttamente che la velocità del suono nei metalli liquidi è generalmente maggiore che negli altri liquidi.

I metalli solidi sono capaci di sostenere bene elevati sforzi di taglio. I metalli liquidi sono incapaci di sostenere azioni di taglio statiche, come accade per la maggior parte dei liquidi. C'è tuttavia un'eccezione interessante. Si osserva che alcune onde ultrasoniche ad altissima frequenza si propagano nei liquidi come disturbi di taglio. Le onde di taglio si propagano facilmente nei solidi e, in un certo senso, l'osservazione delle onde di taglio nei metalli liquidi segnala gli effetti della struttura istantanea degli atomi che comincia a entrare in gioco. Questa è a sua volta legata alle forze ione-ione e quindi agli elettroni.

Per quanto riguarda le proprietà termiche, si sa da più di un secolo che la conduttività termica di una sostanza è proporzionale alla conduttività elettrica e alla temperatura. Poiché i cambiamenti di conduttività (che è l'inverso della resistività) dovuti alla fusione sono piccoli, la stessa cosa si deve verificare per la conduttività termica dei metalli liquidi. Dato che agli elettroni liberi si deve la maggior parte del flusso di calore, i metalli liquidi possiedono conduttività termiche molto più elevate dei liquidi isolanti. Inoltre, alcuni metalli liquidi associano la loro notevole conduttività termica a un'alta capacità termica. Queste proprietà caratteristiche rendono i metalli liquidi molto utili per l'ingegnere termotecnico come materiali per trasportare il calore verso e da gli scambiatori di calore. Fra tutti i metalli liquidi, quelli studiati più a fondo sono probabilmente il sodio e il potassio che hanno punti di fusione abbastanza bassi e che sono stati usati sia soli sia in leghe per agevolare il trasporto del calore nei reattori nucleari.

In questo articolo ho limitato le mie osservazioni ai metalli liquidi monoatomici semplici. Esistono sistemi più complessi, come il tellurio e il selenio liquidi, che sembrano raggruppare gli elettroni in grappoli e talvolta in anelli. Oggi è disponibile un'enorme quantità di dati sulle leghe, e si sta lentamente progredendo verso la comprensione delle loro proprietà sia dal punto di vista dei fluidi a multicomponenti sia come parte del problema generale del comportamento degli elettroni in sistemi densi e disordinati. Come i metalli liquidi puri, i sistemi complessi di metalli liquidi costituiscono una sfida all'ingegnosità sia dei teorici sia degli sperimentatori.

Le scimmie di città

In India le scimmie rhesus condividono da secoli con gli uomini gli agglomerati urbani. La vita cittadina ha per caso influito sul loro comportamento e sulla loro capacità di risolvere i problemi?

di Sheo Dan Singh

Le scimmie rhesus dell'India appartengono essenzialmente a due società diverse: quella di bosco e quella urbana. Le scimmie di città dimorano sui tetti delle case, in edifici abbandonati e in ogni altro ricovero urbano dove possano trascorrere la notte tranquillamente, senza essere disturbate dall'uomo. Costituiscono uno spettacolo assai comune nei villaggi, nelle città e nelle metropoli di moltissime regioni indiane. In genere gli indú le considerano animali sacri, al pari delle vacche: la leggenda vuole che in un'epoca remota una scimmia di nome Hanuman sia accorsa in aiuto della divinità indú Rama nella lotta contro Ravana il re di Ceylon. Di conseguenza, in diverse parti della penisola, le scimmie sono tuttora oggetto di culto e condividono liberamente con l'uomo l'habitat urbano.

Le scimmie di città differiscono notevolmente per carattere e comportamento dalle loro cugine della foresta. Mi è allora venuta in mente l'idea di apprendere, dallo studio di questi primati cittadini, alcune notizie sugli effetti piú elementari della vita urbana sull'uomo. La decisione di intraprendere una ricerca in tal senso mi è stata ispirata da una conversazione che ebbi con Harry F. Harlow della Università del Wisconsin, i cui studi di laboratorio sul comportamento delle scimmie hanno sollevato tanti interessanti interrogativi sullo stesso comportamento umano. Quello che segue è il resoconto di ciò che i miei colleghi e io siamo stati in grado di accertare, in base all'osservazione diretta e a prove di laboratorio, a proposito degli effetti della vita di città sulle scimmie dell'India.

Una delle conseguenze che subito balzano agli occhi riguarda le preferenze alimentari dei soggetti. In genere le scimmie rhesus dimoranti nei boschi si nutrono essenzialmente delle foglie e dei frutti di piante come il banyan (fico indiano), il fico comune, il mango, il tamarindo e il jambos (la cosiddetta « melarosa » dei tropici). Dal canto loro le scimmie che si sono stabilite nei centri abitati sono diventate ghiotte anche di alimenti cucinati dall'uomo, come il *chapatis* (pane indiano), i cereali abbrustoliti, le arachidi tostate e persino certi cibi piccanti. Nel corso delle prove durante le quali venne offerta alle scimmie di città la scelta tra alimenti diversi, i soggetti rivelarono una spiccata preferenza per i cibi cotti, mentre le scimmie della foresta trascurarono le vivande cucinate e abbrustolite, rivolgendo tutta la loro attenzione ai frutti e agli ortaggi crudi.

Naturalmente le abitudini delle scimmie di città differiscono in misura notevole da quelle delle scimmie di bosco anche per quanto riguarda i modi di procurarsi il cibo. Nei centri abitati capita sovente che sia la popolazione a dar da mangiare alle scimmie di propria iniziativa (io stesso lo facevo da bambino), ma in genere gli animali di città vivono di furti. Non sono rare le incursioni nelle botteghe di generi alimentari, nelle cucine delle abitazioni, sui banchetti dei mercatini all'aperto; talvolta le scimmie urbane effettuano veri e propri « scippi », specialmente a danno di bambini, causando spesso ferite alla vittima dell'aggressione. Di conseguenza le scimmie di città sono costantemente alle prese con bottegai infuriati e escono spesso malconce dai frequenti scontri. Tuttavia, nonostante questo margine di incertezza, i rhesus urbani si sono perfettamente adattati alla situazione, fino al punto di preferire decisamente la vita di città alla vita di bosco: catturati e trasferiti nella foresta, si affrettano a rientrare in città non appena lasciati nuovamente liberi.

In fatto di abitazione le scimmie urbane rivelano, a differenza di quelle dei boschi, abitudini piuttosto stabili. Mentre le scimmie dei boschi si accoccolano per trascorrere la notte su qualche albero nella zona dove hanno trascorso la giornata alla ricerca del cibo e dell'acqua, scegliendo raramente la stessa pianta per piú notti consecutive, le scimmie di città fanno ritorno ogni notte nello stesso luogo, da cui si allontanano soltanto se cacciate a forza.

Le scimmie urbane, al pari di quelle dei boschi e dei primati in genere, vivono in gruppi resi saldi da potenti legami emotivi e da uno spiccato senso di reciproca dipendenza. Ma che cosa tiene insieme le società dei primati non umani? Sono molti gli psicologi e gli antropologi convinti che il nesso fondamentale sia di natura sessuale, ma in base all'osservazione diretta delle scimmie rhesus dell'India noi siamo del parere che il sesso non basti a spiegare la saldezza dei gruppi oggetto di studio. Le scimmie, tanto quelle di città quanto quelle di bosco, conservano infatti la vita di gruppo non soltanto nella stagione degli accoppiamenti, ma anche per il resto dell'anno. Abbiamo anzi osservato che proprio durante la stagione degli accoppiamenti tende ad aumentare il comportamento aggressivo che minaccia di infrangere la coesione del gruppo. Siamo inoltre in grado di citare un esempio significativo e probabilmente caratteristico, a proposito di interesse e di attaccamento al gruppo, che sarebbe difficile spiegare esclusivamente in base alla motivazione sessuale. Uno scimmiotto cadde in una cisterna d'acqua; immediatamente quasi tutti i com-

Scimmie di Jaipur che si radunano al crepuscolo sui tetti delle case. Le scimmie dimorano nelle città indiane in gruppi che vanno da un minimo di due fino a un massimo di ben settanta individui. Le diversità tra le scimmie di città e quelle della foresta si accentuano in modo particolare per quanto riguarda la composizione dei gruppi, il regime alimentare, il comportamento dei leader e la complessità psicologica.

L'habitat delle scimmie rhesus in India si estende dai contrafforti dell'Himalaya alla zona compresa tra i 20 e i 17 gradi di longitudine nord sull'altopiano del Deccan.

ponenti del folto gruppo di cui il piccolo faceva parte si precipitarono verso la cisterna, dando segni di viva apprensione: stavano già per lanciarsi in acqua quando noi sopraggiungemmo in soccorso dello scimmiotto.

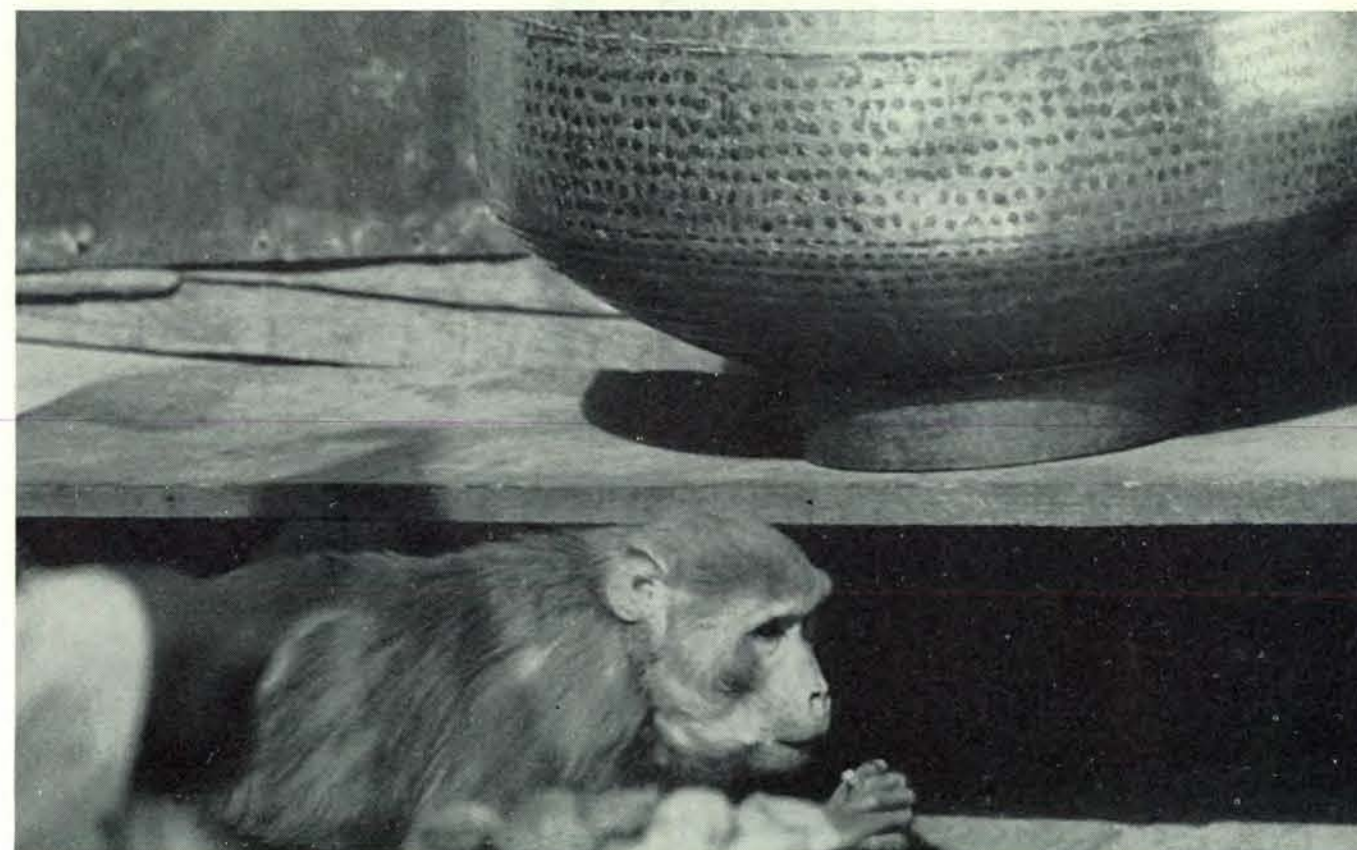
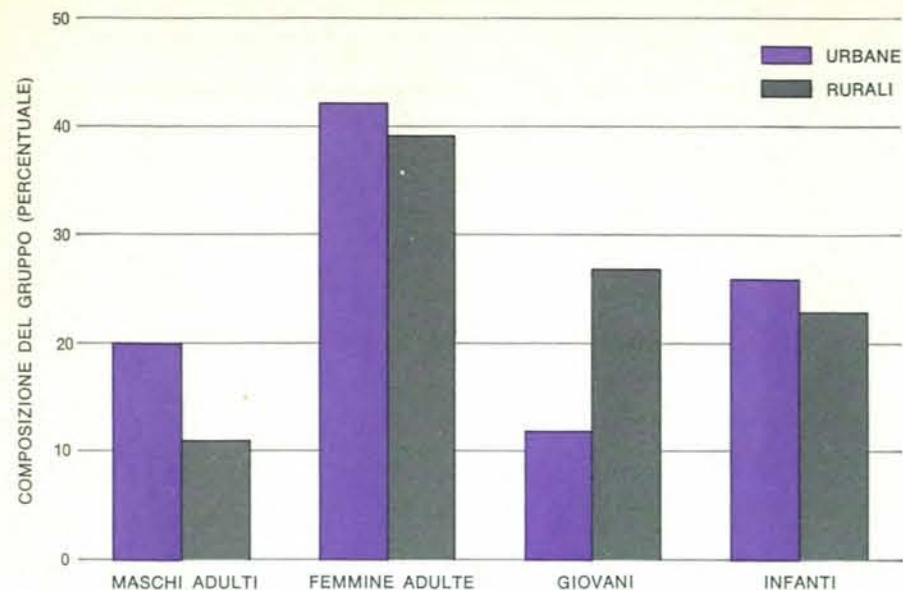
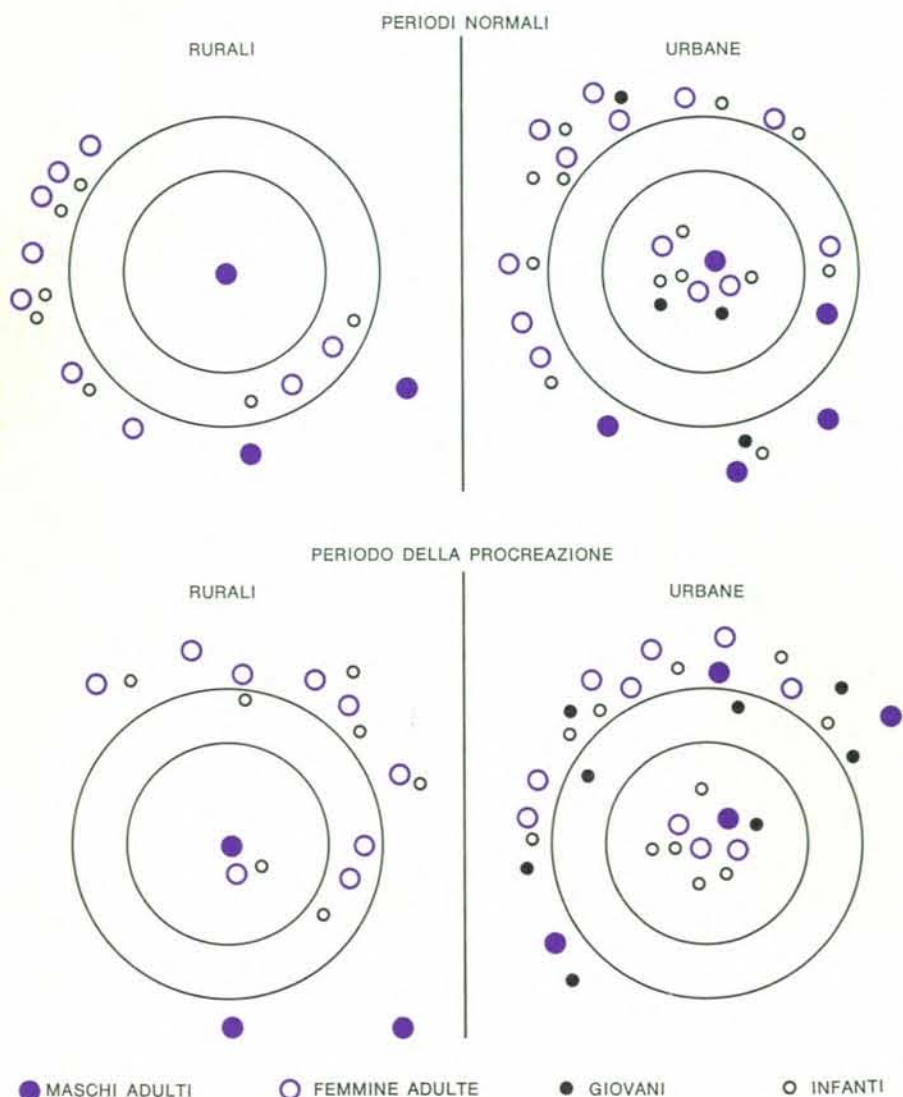
I gruppi di scimmie, sia di città sia di bosco, sono di estensione estremamente variabili: noi, per esempio, ci siamo imbattuti in un branco di settanta individui. Tra gli adulti del gruppo il numero delle femmine è nettamente superiore a quello dei maschi, forse perché i maschi dominanti si incaricano di ridurre la schiera dei rivali. Charles H. Southwick, della Johns Hopkins University, ha accertato che in un gruppo di scimmie urbane di numerosità media, il 20 % circa è costituito da maschi adulti, il 42 % da femmine adulte, il 26 % da infanti e il 12 % da esemplari giovani. Nei gruppi dimoranti nei boschi la proporzione corrispondente era dell'11 % di maschi adulti, del 39 % di femmine adulte, del 23 % di infanti e del 27 % di giovani. Il censimento di Southwick ha consentito inoltre di stabilire che il gruppo medio di scimmie di città è costituito da ventidue membri, mentre il gruppo medio delle scimmie di bosco è composto di circa cinquanta esemplari. Il conteggio da noi eseguito ha rivelato, per certi gruppi non urbani, una densità media di circa ventun individui. Nei nostri conteggi non siamo però riusciti a individuare nessun elemento significativo che potesse suggerire un effetto spiccato della vita cittadina di per sé sulle dimensioni e sulla composizione dei gruppi di scimmie urbane. È comunque evidente che la popolazione delle scimmie risente notevolmente dell'atteggiamento degli abitanti della città: nei centri abitati prevalentemente da devoti induisti, e quindi da persone piú tolleranti verso le scimmie, tanto le dimensioni dei gruppi quanto la popolazione totale degli animali sono maggiori che altrove.

È circostanza ben nota che in genere le società degli animali primati sono caratterizzate da una vivace competizione tra i maschi e dall'instaurarsi di una gerarchia di dominio che si manifesta con la priorità negli atti dell'alimentazione e in quelli sessuali, e con altri privilegi. Abbiamo osservato che questa caratterizzazione non vale soltanto per i gruppi di rhesus dimoranti nei boschi, ma anche per quelli cittadini. Per individuare il leader di un gruppo non c'era bisogno di condurre una ricerca approfondita: bastava osservare il comportamento del gruppo durante il pasto. In ogni caso è il leader che si arroga il diritto di spartire il cibo a disposizione, mentre le altre scimmie gli fanno corona. Nei gruppi dei boschi il leader addirittura monopolizza gli alimenti. Nel corso di un esperimento predisposto in modo che fosse offerto al gruppo un pasto consistente in quattro chilogrammi e mezzo di cereali, abbiamo notato che il maschio dominante si imponeva immediatamente: in genere non permetteva a nessun altro membro del gruppo di consumare il cibo con lui, ma anche durante la stagione della procreazione (i tre mesi autunnali) consentiva soltanto a una femmina adulta e al suo piccolo di spartire il pasto con lui.

Quando il medesimo esperimento venne condotto presso un gruppo di scimmie di città, si notò subito una differenza sostanziale: il maschio dominante ammetteva al pasto comune, indipendentemente dalla stagione, un buon numero di femmine adulte, di piccoli e di individui giovani (fino a un quarto del totale del gruppo). Inoltre si è notato, tra i componenti del gruppo cittadino rispetto a quelli del gruppo rurale, un comportamento molto meno aggressivo sul luogo del pasto. È da ritenere che le scimmie urbane si abituino presto a dividere il cibo a causa della scarsità delle riserve alimentari a loro disposizione.

Il comportamento relativamente non aggressivo delle scimmie di città sul luogo del pasto non significa che questi individui siano in genere meno aggressivi di quelli che dimorano nei boschi. Anzi, le prove da noi condotte in laboratorio dimostrano che le scimmie urbane sono molto piú aggressive delle cugine della foresta.

Il piano di questi esperimenti consisteva nel riunire coppie e gruppi di scimmie che non si erano mai viste prima, allo scopo di osservarne l'interazione sociale. Per gli esperimenti sulle coppie ci servimmo di un locale di 0,15

Madri con i loro piccoli che si raccolgono attorno a una vasca di pietra nel cortile di una casa di Jaipur, mentre due adulti sono all'abbeverata. Le scimmie urbane raramente si incontrano con quelle rurali; a differenza di queste ultime si procurano di solito da mangiare rubando e perciò sono continuamente tenute a bada, anche a bastonate, dai negozianti delle città.

A proprio agio al mercato una scimmia adulta di Jaipur sgranocchia un'arachide. Lo studio dell'autore dimostra come le scimmie di città sono piú aggressive di quelle di bosco e straordinariamente reattive e intraprendenti di fronte alle novità.

Il numero delle femmine è superiore a quello dei maschi tra gli esemplari adulti sia nei gruppi di scimmie urbane sia in quelli di scimmie rurali. Nei gruppi urbani si contano più maschi, in quanto i leader sono meno aggressivi verso i rivali potenziali.

La misura del predominio dei leader di gruppo non è la stessa per le scimmie urbane e per quelle rurali. L'osservazione sul comportamento nel luogo del pasto nella foresta (*a sinistra*) ha rivelato che il maschio dominante non spartisce con nessuno il proprio cibo tranne che nei periodi di procreazione, in cui accoglie soltanto una femmina adulta e il suo piccolo. Il leader urbano è (*a destra*) molto meno rigoroso.

metri cubi e restammo a osservare i vari accoppiamenti: due scimmie urbane, due scimmie di bosco, e una scimmia urbana con una di bosco. Analogamente, servendoci di un locale piú ampio (metri 5,50 × 5,50 × 5,50), riunimmo gruppi (da quattro a sei componenti ciascuno) di scimmie estranee l'una all'altra, sperimentando le varie combinazioni: urbane con urbane, rurali con rurali, urbane con rurali.

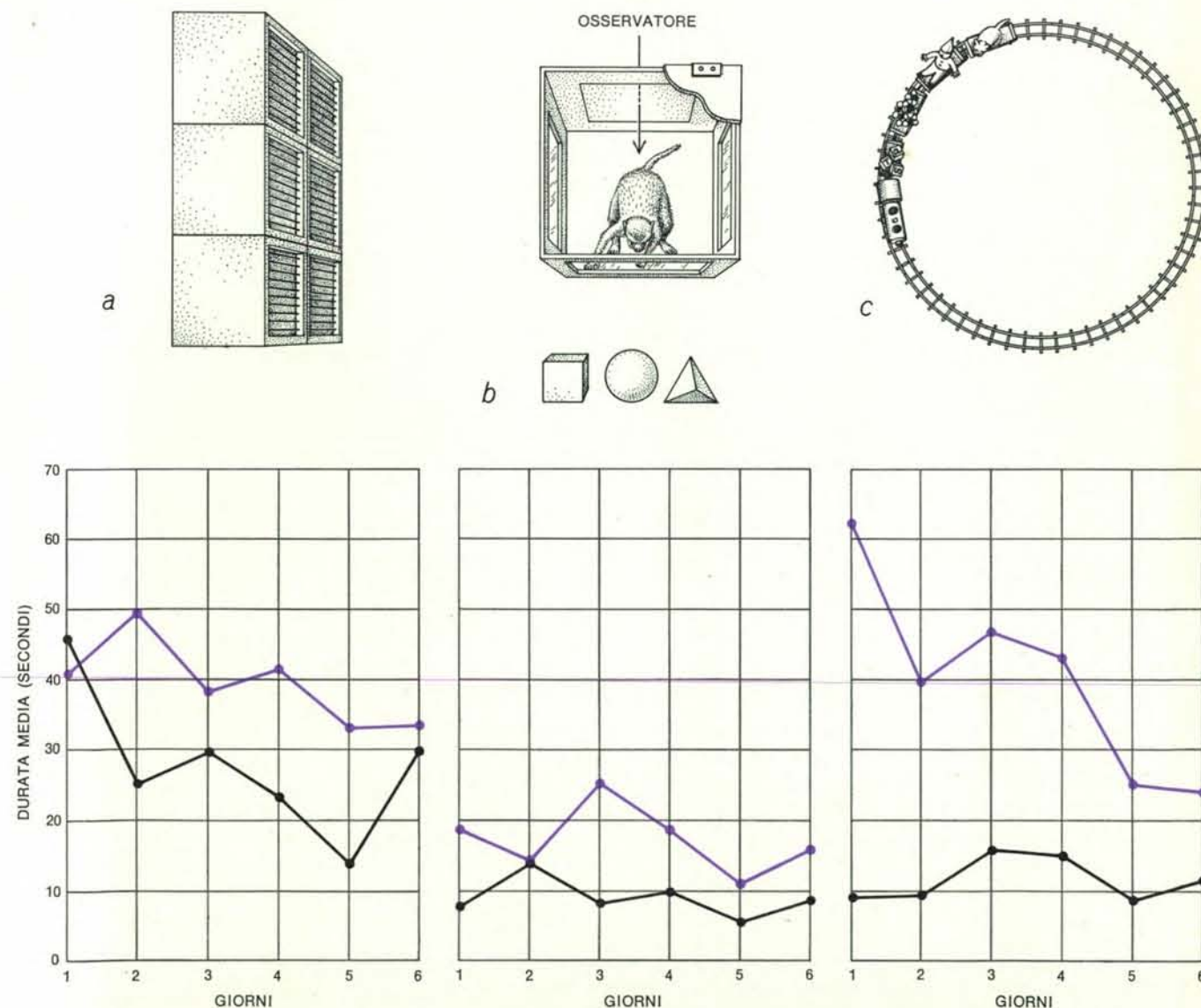
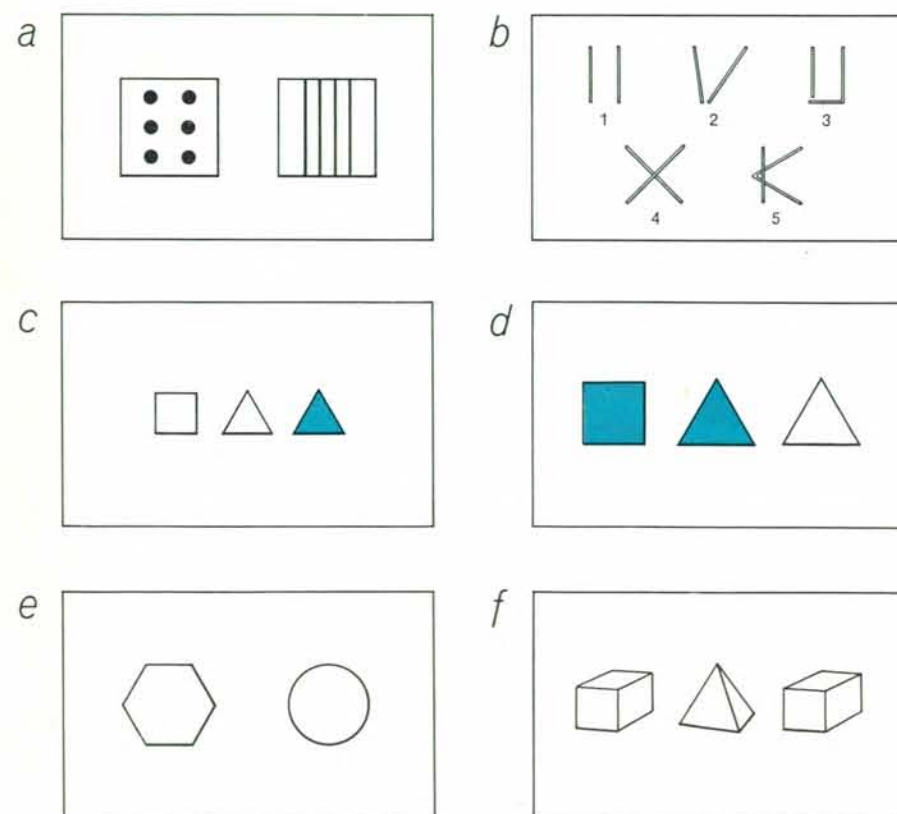
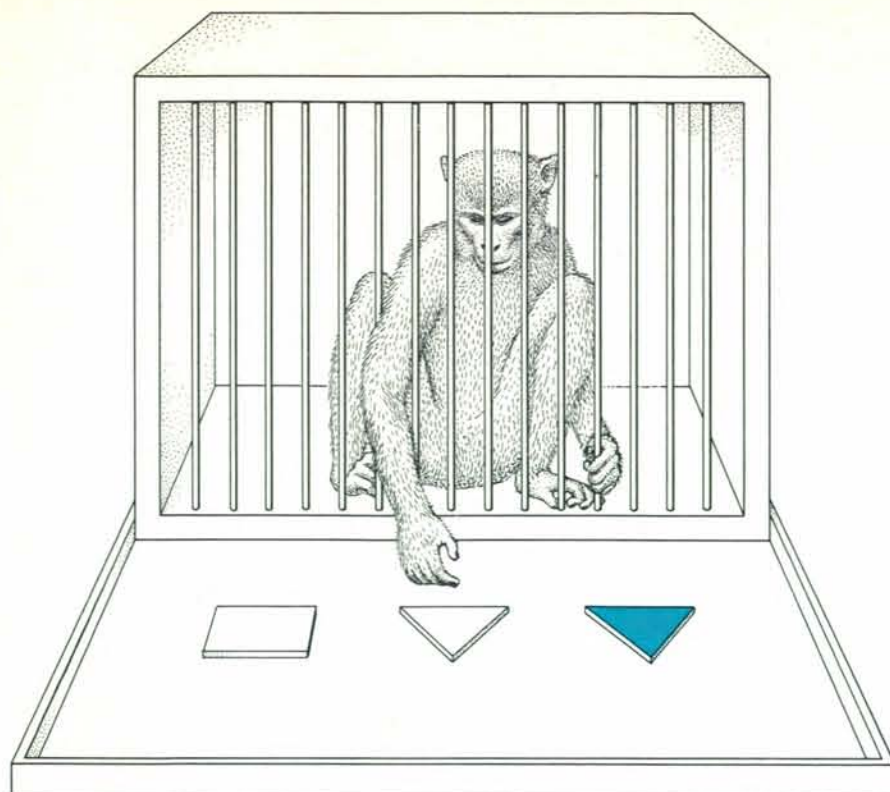
Le scimmie di bosco insieme si rivelarono relativamente pacifiche e tranquille, mentre quelle di città, indifferenti al fatto che i nuovi compagni fossero di origine cittadina o rurale, cominciavano subito a litigare con gli individui sconosciuti. E si trattava di risse furibonde, con un seguito di ferite gravi e, in due casi, terminate con la morte di uno dei contendenti. Negli esperimenti, nel corso dei quali le scimmie dovevano battersi per il cibo, abbiamo accertato che in genere gli individui del bosco cedono a quelli di città. Anzi, mentre di solito i maschi predominano sulle femmine, accadeva spesso che i maschi rurali soccombessero alle femmine urbane.

Perché mai le scimmie di città sono tanto piú aggressive di quelle della foresta? Si potrebbero offrire diverse spiegazioni, ma direi che il motivo principale è da ricercare nell'opprimente ambiente urbano, caratterizzato soprattutto dalla limitata disponibilità di alimenti, che costringe le scimmie a battersi tra loro e con gli stessi esseri umani per la sopravvivenza. Infatti le scimmie di città non sono soltanto aggressive nei confronti dei propri simili, ma anche verso la specie umana.

Non sono rari i casi di gente uccisa a morsi dalle scimmie nelle città indiane. Anche un componente del nostro gruppo di ricerca è stato oggetto di una grave aggressione: uno scimmiotto, da lui sfiorato casualmente, emise un breve lamento e tanto bastò perché un nugolo di adulti, maschi e femmine, si precipitasse sul nostro collaboratore, attaccandolo a morsi cosí ferocemente da costringerlo al ricovero in ospedale.

Le scimmie di bosco sono timide e hanno paura degli esseri umani: allo stato libero si danno alla fuga non appena scorgono una persona a centinaia di metri di distanza, ma anche dopo due anni di acclimatazione in laboratorio entrano in agitazione alla vista di un estraneo. Invece le scimmie di città non hanno affatto timore degli uomini: si avvicinano disinvoltamente alla persona che si ferma a pochi passi da loro, giungendo persino, come ho già detto, a strapparle il cibo di mano. In laboratorio escono appena possono dalla gabbia (cosa che una scimmia di bosco non farà mai, anche se vede il cancelletto aperto) e cominciano a esplorare audacemente l'ambiente. Abbiamo persino messo alla prova le scimmie di città con scheletri umani di dimensioni naturali, con cobra impagliati e con altri oggetti che solitamente evocano nei primati una viva sensazione di paura, ma le scimmie non hanno dimostrato alcun segno di spavento, manipolando anzi con curiosità gli oggetti a loro sconosciuti.

Vien fatto di pensare che, a causa dell'esperienza fatta con la complessità della vita cittadina, le scimmie urbane abbiano acquisito una sviluppatissima capacità di reagire positivamente a situazioni del tutto nuove o complesse. Nel Centro di ricerca regionale sui primati dell'Università del Wisconsin, Robert A. Butler ha scoperto che le scimmie posseggono una curiosità quanto mai sofisticata: sono capaci di tenere abbassata per ore una leva che lascia aperto un finestrino da cui si ha una vista interessante. Negli studi attualmente in corso nel medesimo laboratorio Gene P. Sackett ha accertato come il livello della curiosità di un primate, o comportamento esplorativo, dipenda dalla portata delle esperienze percettive e motorie del soggetto. Sulla traccia di questi esperimenti abbiamo tentato, a nostra volta, di scoprire in che rapporto stia il comportamento esplorativo delle scimmie di città rispetto a quello delle scimmie di bosco.

L'apparecchio di Butler, una cabina chiusa con finestrini che si possono aprire abbassando una leva, si è dimostrato inutilizzabile nel caso delle scimmie di bosco: ci è stato impossibile, infatti, addestrarle a manovrare la leva per aprire i finestrini. Ci siamo serviti pertanto di una cabina provvista di finestre che non era necessario aprire: le aperture erano tre, ciascuna praticata su una parete diversa e orientata verso un'immagine diversa. Da una si aveva la vista di una composizione semplice di figure solide in legno di color grigio; da un'altra si vedeva una batteria di gabbie vuote per porcellini d'India; la terza si apriva su un trenino, carico di giocattoli variopinti, che correva su di un binario circolare. Lasciammo ciascuna scimmia per diversi giorni nella cabina, osservandone per un'ora e mezzo al giorno il comportamento attraverso uno specchio inserito sulla quarta parete.

La curiosità relativa delle scimmie urbane rispetto a quella delle scimmie di bosco è stata valutata confinando i soggetti in una cabina provvista di finestrini orientati su spettacoli diversi: una batteria di gabbiette (*a*), un gruppo di solidi in legno (*b*), un trenino carico di giocattoli multicolori che correva su un binario circolare (*c*). I solidi si rivelarono poco interessanti per entrambi i gruppi; un tempo maggiore venne dedicato alla contemplazione delle gabbiette vuote. Le scimmie di città si dimostrarono più interessate al trenino delle scimmie di bosco, che passarono invece molto più tempo a osservare le gabbie.

Batteria di reattivi impiegata per determinare se le scimmie urbane avessero sviluppato in sé doti intellettive superiori. Le bestiole appartenenti ai due gruppi avevano la possibilità di scegliere tra vari oggetti. Se la scelta era esatta, la scimmia veniva ricompensata. La prima prova (*a*) imponeva di distinguere tra rappresentazioni visive diverse. Il reattivo successivo (*b*) prevedeva che le scimmie estraessero la bacchetta giusta da ciascuna coppia. La terza prova era destinata a premiare la scimmia che avesse scelto l'oggetto « anomalo » per colore quando tutti e tre gli oggetti fossero di formato ridotto (*c*) e l'oggetto « anomalo » per forma quando gli oggetti fossero tutti di grande formato (*d*). Altre prove comportavano la discriminazione tra due forme (*e*) e la selezione di un oggetto « anomalo » su tre (*f*). I risultati sono illustrati nella pagina a fronte.

Nessuna delle scimmie sottoposte all'esperimento trascorse molto tempo a guardare dal finestrino che dava sui solidi di legno. Tanto quelle di città quanto quelle di bosco, ma un po' piú le prime che le seconde, si dimostrarono maggiormente interessate alla vista delle gabbie per cavie. La vista del trenino in movimento mise in luce una differenza notevolissima tra scimmie urbane e scimmie rurali: le prime reagirono sensibilmente a questo spettacolo complesso, mentre le seconde non si mostrarono interessate al trenino molto di piú di quanto non si interessassero ai solidi di legno.

Era possibile accettare questo diverso comportamento come una prova di maggiore intelligenza a favore delle scimmie di città? Non mancavano i motivi per credere che fossero davvero in grado di sviluppare doti intellettive superiori. Per prima cosa lo stesso ambiente urbano che le aveva viste crescere aveva loro fornito una gamma di esperienze molto piú variate di quelle accessibili alle scimmie di bosco. Inoltre i cacciatori che avevano catturato gli esemplari destinati al nostro laboratorio si dissero convinti che, all'atto della cattura, le scimmie cittadine si comportassero in modo molto piú intelligente di quelle dimoranti nei boschi: nonostante il fatto che noi avessimo offerto sette dollari per ogni esemplare urbano contro soli due dollari per ogni capo rurale, i cacciatori avevano preferito battere la foresta, sicuri che le scimmie di città fossero troppo astute per cadere facilmente nella trappola.

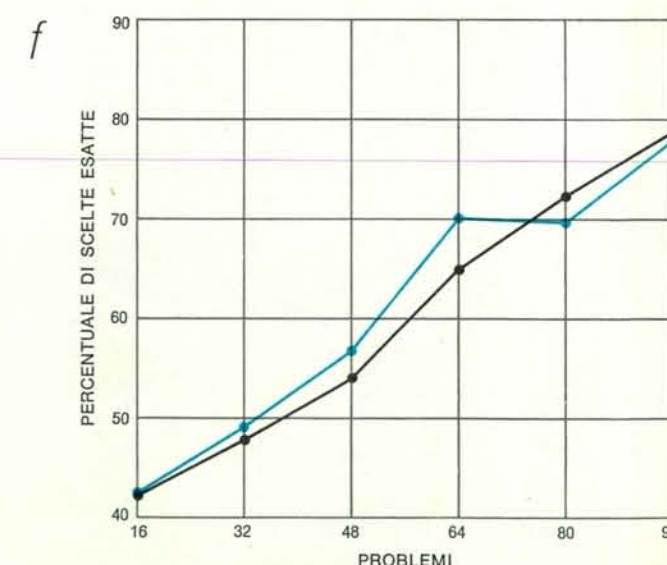
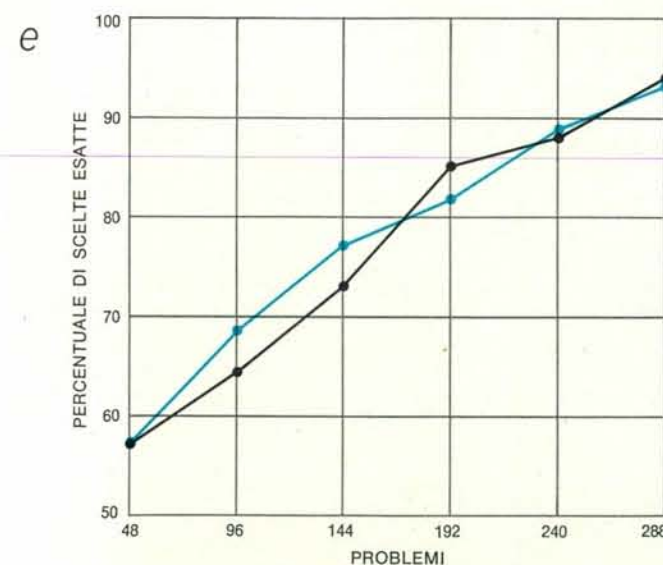
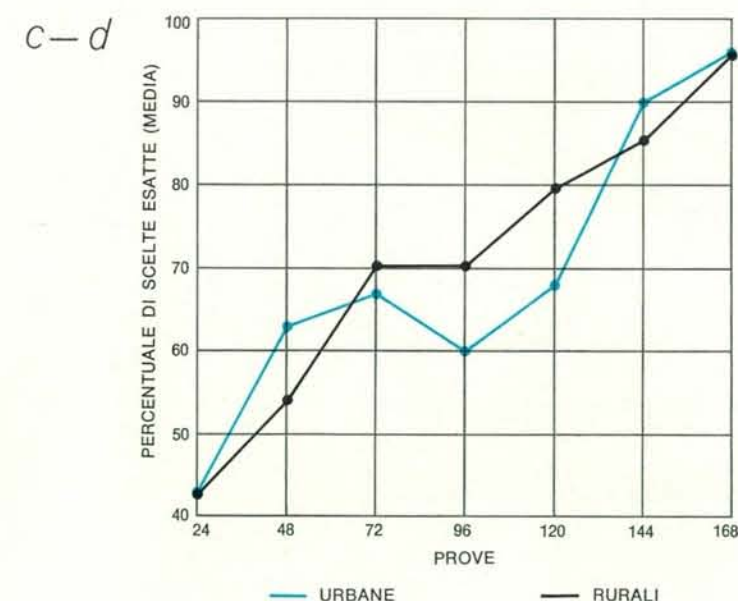
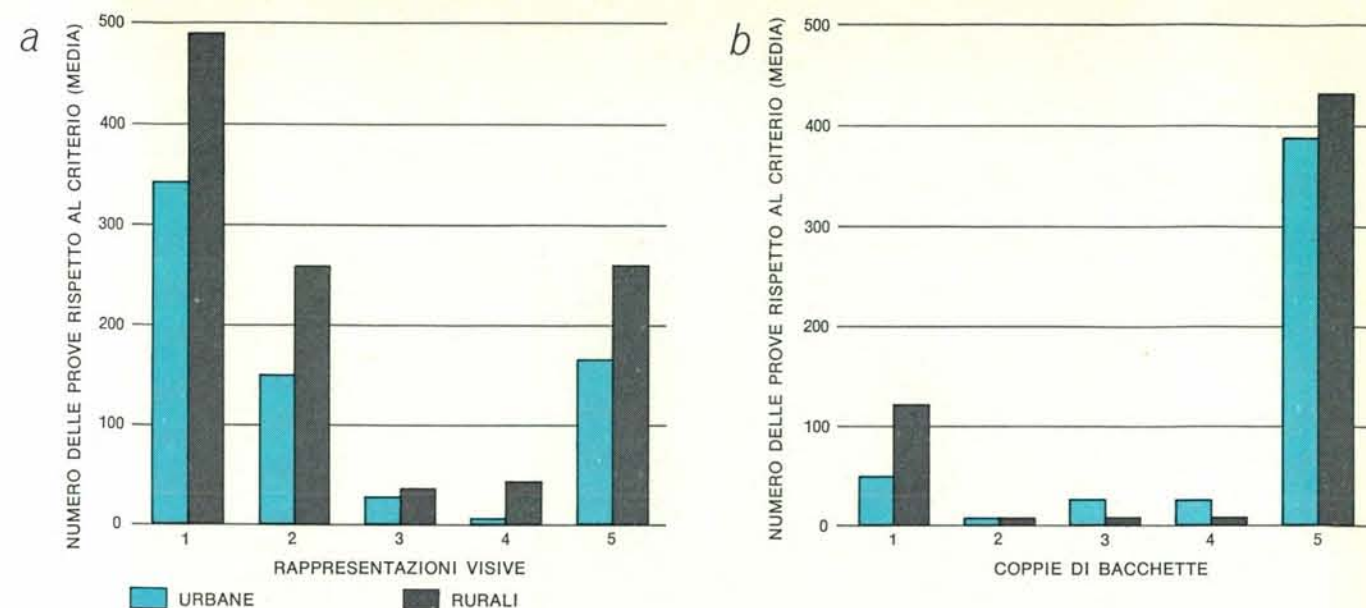
Abbiamo anche condotto una serie di esperimenti elaborati per sondare l'intelligenza relativa tanto dell'uno quanto dell'altro tipo di scimmie rhesus, presentando loro certi problemi che offrivano un grado di difficoltà notevole, tanto da non risultare superabile neppure da parte di molti bambini. In un caso, per esempio, ci siamo serviti, come materiale di esperimento, di pezzi di legno di varie dimensioni (con superficie di dieci oppure di venti centimetri quadrati) e diversi per forma (quadrata o triangolare) e per colore (rosso o verde). Di volta in volta la scimmia venne posta di fronte a tre oggetti, con il compito di sceglierne uno che, a seconda del contesto, differisse per questo o quell'elemento dagli altri due. Facciamo l'esempio di un quadrato verde, di un triangolo pure verde e di un triangolo rosso. Se le tre figure erano della dimensione piú piccola, la scimmia veniva ricompensata se sceglieva l'oggetto anomalo per il colore (il triangolo rosso); se invece il

a
NUMERO DELLE PROVE RISPETTO AL CRITERIO (MEDIA)
RAPPRESENTAZIONI VISIVE
URBANE
RURALI

b
NUMERO DELLE PROVE RISPETTO AL CRITERIO (MEDIA)
COPPIE DI BACCHETTE

c—d
PERCENTUALE DI SCELTE ESATTE (MEDIA)
PROVE
URBANE
RURALI

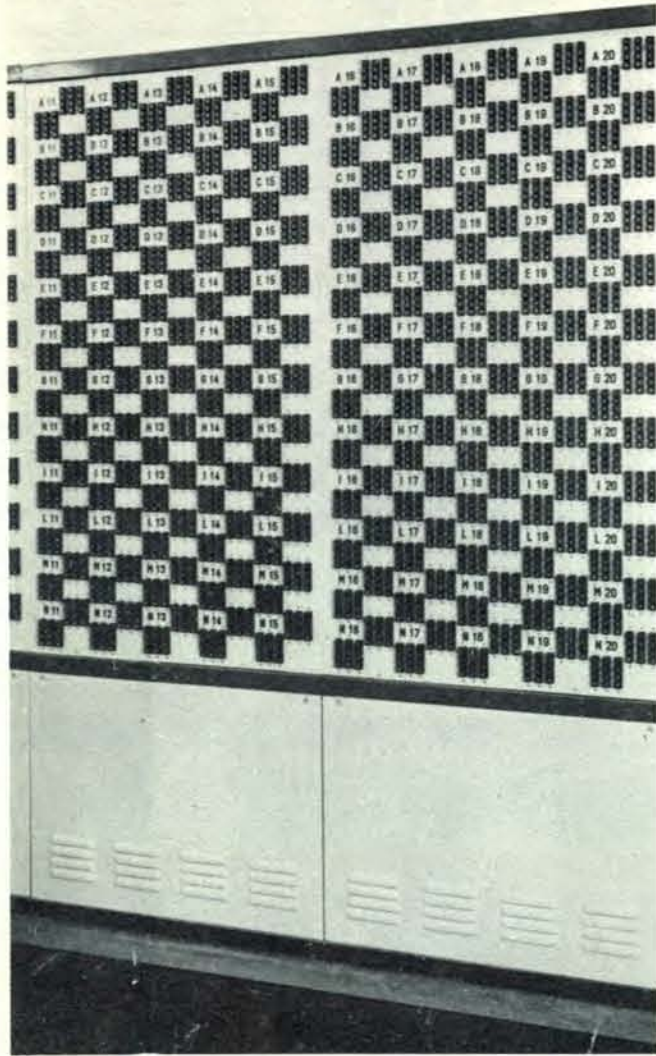
e
PERCENTUALE DI SCELTE ESATTE
PROBLEMI

f
PERCENTUALE DI SCELTE ESATTE
PROBLEMI

La sostanziale parità dell'intelligenza tra le scimmie urbane e quelle di bosco è stata dimostrata in tutte e sei le prove, a eccezione del minor rendimento rivelato dalle scimmie rurali per certi problemi del primo reattivo (*a*). L'autore attribuisce questo risultato all'iniziale stato di ansietà in cui si trovavano le scimmie di bosco nel corso della prima prova. Ne conclude che l'acume delle scimmie urbane non rispecchia una maggior maturità intellettiva, ma una maggior complessità psicologica.

formato delle figure era quello più grande, la scelta giusta doveva cadere sull'oggetto che fosse anomalo per la forma (il quadrato verde). Per poter risolvere il problema, l'animale doveva imparare che la forma o il colore dell'oggetto erano importanti soltanto in relazione a un altro fattore: in questo caso le dimensioni dei tre oggetti. Complicammo ulteriormente i vari problemi offrendo alla scimmia, di volta in volta, le varie combinazioni secondo una successione casuale.

Con nostra grande sorpresa scoprimmo che le scimmie di bosco registrarono più o meno gli stessi risultati di quelle urbane. Non dettero buona prova nell'esperimento iniziale che prevedeva la discriminazione tra varie composizioni ottiche, ma l'esito negativo si poteva attribuire, in questo caso, alla timidezza e alla trepidazione tipiche delle scimmie di bosco. Una volta abituatesi alla situazione sperimentale, anch'esse impararono efficacemente la soluzione ai vari problemi.

Se ne deve concludere che, indipendentemente dagli effetti di natura diversa, la vita cittadina non sviluppa particolarmente l'intelligenza delle scimmie rhesus. Del resto questa conclusione ben si accorda con quanto ha appreso Harlow dai suoi studi di laboratorio: egli ha infatti accertato, in condizioni sperimentali tutt'affatto diverse dalle nostre, che la capacità intellettuale dei primati risente ben poco della situazione ambientale. Le scimmie da lui allevate in uno stato di isolamento sociale (ossia escluse fin dalla nascita dal contatto con altre scimmie) non hanno rivelato nessuna compromissione intellettiva ai reattivi successivi, pur dimostrandosi profondamente turbate nel comportamento sociale, emozionale e percettuale.

Per riassumere le nostre conclusioni, possiamo dire che la vita cittadina modifica le abitudini di pernottamento delle scimmie, ne altera il comportamento nei confronti degli individui della medesima specie, ne accresce l'aggressività, le rende estremamente reattive e intraprendenti nell'accostamento diretto a caratteristiche nuove o complesse dell'ambiente e, in genere, ne potenzia la complessità psicologica, ma senza migliorarne il grado di intelligenza, per quanto il comportamento delle scimmie di città sembri dimostrare un più elevato grado di astuzia. Lascio il lettore a riflettere sulle implicazioni che i risultati di questo studio potrebbero avere per la comprensione degli effetti della vita urbana sul comportamento dell'uomo.

CALCOLATORI ELETTRONICI PER IL CONTROLLO DEI PROCESSI INDUSTRIALI

Del controllo dei processi industriali ci si cominciò ad interessare non appena si resero disponibili i calcolatori elettronici. Di fatto, si cominciò a pensarci nel 1952 dopo che fu chiaro che le prime macchine elettroniche da calcolo avrebbero avuto un seguito commerciale. Le difficoltà cui si sarebbe andati incontro apparvero immediatamente notevoli, ma chi si impegnò a studiare il problema ebbe modo di rendersi conto che l'idea, non ancora matura, lo sarebbe presto divenuta una volta che la tecnologia dei calcolatori si fosse consolidata. L'impiego del calcolatore per il controllo del processo industriale in ogni caso richiedeva:

— una conoscenza del processo assai profonda; al calcolatore si doveva richiedere di simulare in modo quasi perfetto la gamma dei fenomeni che si verificano all'interno di un impianto;

— una strumentazione assai più raffinata di quella disponibile; in effetti il calcolatore capisce un linguaggio « binario », fatto di zeri e di unità, e le misure raccolte dagli strumenti devono essergli fornite dopo l'opportuna traduzione;

— che il costo del controllo non pregiudicasse l'economia del processo; è chiaro che conoscere meglio la dinamica di un reattore chimico e utilizzare apparecchiature di misura più spinte comporta un costo non trascurabile;

— che fosse un'industria ad alto livello di automazione a interessarsi della nuova tecnica, essendo chiaro che quest'ultima proponeva l'accelerazione della fase automativa del processo.

I primi tentativi di una certa consistenza sono stati fatti verso la fine degli anni '50; si può dire che il decennio che sta per chiudersi abbia visto nascere e diventare presto adulta questa tecnologia. Oggi la situazione è la seguente: nel '67 il 10 % dei calcolatori USA (3.500) erano utilizzati a questo fine. Nessuno avrebbe pensato, solo qualche anno fa, che ci sarebbe stato un boom cosí rapido. In Europa le cose sono andate diversamente. Ancora oggi si può dire che l'innovazione vi suscita delle perplessità e, per la verità, non ci sono state corse folli alla novità.

L'Europa è più lenta a sviluppare nuova tecnologia o ad assorbirla; arriva, tuttavia, il momento che si prende atto della situazione creatasi e si corre ai ripari. È quanto succede in Italia nel controllo di processo: l'ENI valuta positivamente un'iniziativa in questo senso e stringe accordi con la divisione elettronica della General Electric per costruire in Italia, su licenza, la sua gamma più aggiornata di calcolatori di processo. Presto avremo a Bari i primi pezzi della serie GE-PAC ed è da pensare che essi affretteranno l'introduzione del controllo nelle aziende più avanzate del paese.

In realtà si è già provato in Italia a far guidare alcuni impianti dal calcolatore; l'esperienza sinora acquisita, se non ha fugato tutte le perplessità del tecnico, non ne ha nemmeno provocato lo scoraggiamento. Permangono dei motivi di riserbo, ma si ammette senza mezzi termini che il tentativo ha già permesso di conoscere a fondo il processo di produzione e questo è un elemento di indubbia importanza nel momento in cui si tirano le somme dell'economia di una tecnica produttiva. Occorre avvertire che gli elementi di informazione resi noti sono scarsi; c'è un'evidente reticenza da parte di chi ha accumulato esperienza in proposito a rivelare per intero ciò che ha appreso. Le ragioni industriali hanno la loro parte.

Ciò che è affiorato nel corso dell'ultimo anno è venuto da una conferenza stampa assai interessante tenuta in Gran Bretagna dai maggiori dirigenti industriali che si erano cimentati col processo e nel corso di un giro per giornalisti specializzati organizzato da un'industria elettronica in Italia, attraverso le aziende che avevano provato a fare altrettanto.

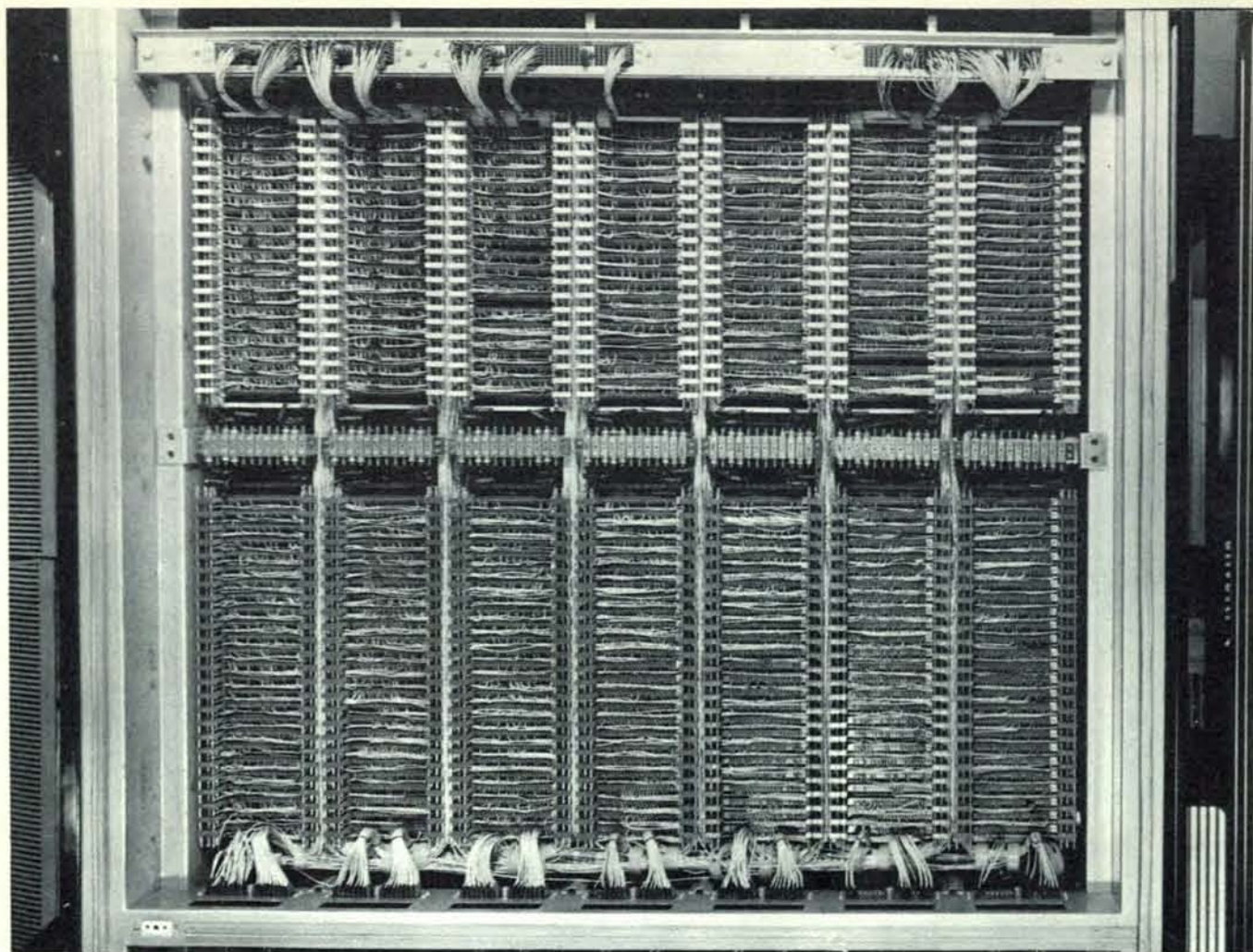
In Gran Bretagna, il ministro per la tecnologia, Mr. A. Wedgwood Benn, ha presentato sei casi di applicazione del processo di preminente interesse. Due interessano l'industria siderurgica, uno una azienda alimentare, un quarto un impianto petrolchimico della British Petroleum, un quinto una cartiera, il sesto uno zuccherificio. Non tutti i relatori hanno mostrato fiducia senza riserve sui risultati ottenuti, nessuno tuttavia ha però lasciato intendere che l'esperienza era da ritenere fallimentare.

Il grande pannello di comando di un convertitore analogico numerico.

La British Petroleum ha messo a punto un processo molto complesso: ha posto sotto controllo un impianto di produzione di acido acetico. In questo caso il ricorso al calcolatore è stato giustificato dall'estrema complessità del procedimento. Ci sono voluti diversi anni per definire un modello matematico che descrivesse correttamente quanto avviene nel cuore dell'impianto. Una immagine delle difficoltà incontrate può essere data dal fatto che si sono dovute controllare le reazioni cui danno luogo gli 80 diversi componenti presenti nel reattore. Il costo dell'operazione è stato molto elevato; è stato valutato in circa 400 milioni di lire. L'esperienza acquisita ha, però, permesso di conoscere a fondo quanto succede nell'impianto e ciò viene giudicato dalla BP come una conoscenza di incalcolabile valore. I futuri impianti dello stesso tipo se ne avvantaggeranno sensibilmente.

Samuel Fox, un'industria siderurgica di Sheffield, si è servita del calcolatore per tagliare delle billette di acciaio nelle dimensioni volute. L'intera operazione viene controllata, ormai da diversi anni, da una macchina da calcolo che vaglia rapidamente le operazioni e taglia l'acciaio secondo le sequenze più convenienti. Si riducono notevolmente gli sprechi e il tempo operativo. Poco meno di 60 milioni il costo di installazione dell'automatismo con un risparmio annuo valutabile sui 50 milioni.

Il giro di visite in Italia ha portato i giornalisti specializzati alla cartiera Burgo di Mantova, all'impianto di produzione di ammoniaca della Montedison a Porto Marghera, alla Cementir di Taranto, al convertitore LD dell'Italsider, a Taranto.

Nella cartiera di Mantova ciò che viene tenuto sotto stretto controllo è il grado di umidità del foglio di carta in produzione: non deve superare il 10 %. Il calcolatore ha numerosi sensori che rilevano ogni minuto una cinquantina di misure dalla strumentazione disponibile; le analizza e interviene sui componenti del processo quando ne avverte la necessità. La produzione ne risulta migliorata in modo sostanziale: la carta, alla fine, risulta di peso assai prossimo a quello desiderato. Il risparmio è, secondo i tecnici, notevole.

Un armadio aperto svela le migliaia di interconnessioni fra i circuiti.

Nell'impianto di produzione di ammoniaca siamo di fronte a una serie di operazioni molto complesse. La materia prima è la virgin nafta che va, in una prima fase, desolforata poi vaporizzata, mescolata con vapore assieme anche a una determinata quantità di aria e avviata in un reattore. A questo punto si ha la reazione di reforming: il gas che se ne ricava, dopo la conversione dell'ossido di carbonio, viene liberato dell'anidride carbonica e inviato alla sezione finale di sintesi che dà l'ammoniaca. Dal breve richiamo delle tappe del processo si ha una idea della catena di eventi e quindi di variabili che è necessario controllare. I lavori condotti a Porto Marghera hanno già permesso di migliorare il rendimento dell'impianto del 2 %.
Alla Cementir il prodotto è il cemento. Si parte da calcare, argilla e altre materie prime per ottenere una miscela omogeneizzata che si porta a temperature superiori ai 1200 gradi. Il clinker che si forma, una volta raffreddato, viene macinato e poi mescolato con additivi che danno al cemento le proprietà desiderate. L'obiettivo è ora di introdurre nel forno di cottura miscele bene omogeneizzate e di composizione costante; il calcolatore interviene per controllare questa fase. C'è un modello matematico dell'intero processo che fa da guida all'impianto e ne consente la conduzione a regimi ottimali. Benché l'automatismo non sia ancora completo i risultati già registrati sono valutati di sicuro interesse.
Il processo LD converte ghisa in acciaio. In un grosso forno orizzontale vengono immessi ghisa fusa, rottami di ferro e altri prodotti. L'insieme è sottoposto al soffiaggio di ossigeno per eliminarne, ad alta temperatura, le impurità. Per rendere il processo ottimale, serve un accurato controllo della carica del convertitore. Al calcolatore è assegnato il compito di definire, in base al tipo di acciaio che si intende produrre, le quantità delle varie componenti e dell'ossigeno da soffiare.
Gli esempi descritti, non sono che una parte della gamma degli impieghi del calcolatore in un impianto industriale. Ad esempio, oltre al controllo del convertitore, in siderurgia si sono trovati quello dell'alto forno, dei laminatoi e perfino dell'intero stabilimento siderurgico, vale a dire dell'intero ciclo di produzione dell'acciaio. Si hanno notizie di tentativi positivi anche nel settore dell'alluminio. In campo chimico, oltre all'ammoniaca, notevoli attenzioni sono andate alla produzione dell'etilene.

informazioni ENI

L'intero campo della raffinazione petrolifera si può condurre in modo automatico, cosí come le operazioni di cracking, di reforming, che permettono di ottenere particolari tagli di benzine. Anche con i processi di polimerizzazione e di alchilazione si è provato ad impiegare i sistemi automatici. In California un calcolatore è stato utilizzato per regolare il flusso di petrolio, a temperatura voluta, da 180 pozzi di produzione ai serbatoi sistemati a notevole distanza.
Nelle centrali elettriche piú moderne il calcolatore è ormai un componente quasi ineliminabile soprattutto in quelle nucleari.
Previsioni degne di considerazione indicano che il 12 % di calcolatori servirà domani per questo genere di impieghi. Il fatto stesso che nessuna branca produttiva si sia sottratta al tentativo di introdurre il calcolatore all'interno degli impianti fa capire ciò che l'industria si attende. Occorre tener conto che nelle aziende organizzate verticalmente secondo i modelli di gestione automatica il mezzo di calcolo è già diventato uno strumento cui si ricorre naturalmente.
Da un punto di vista tecnico, il controllo di processo si può ottenere in due modi diversi. Si può far raccogliere alla macchina una certa serie di dati che, trattati, vengono presentati a un operatore nella forma piú opportuna. Quest'ultimo decide se e come modificare il processo. In tal caso, si suol dire che il controllo avviene a circuito aperto. È, in genere, quanto succede quando ci si contenta di render facile all'operatore il suo intervento. Si può puntare, addirittura, all'automazione completa, a una fase cioè in cui il calcolatore sa da sé come comportarsi nelle varie situazioni e non necessita dell'intervento umano. Si dice che in questo secondo caso l'impianto funziona a circuito chiuso.
Non sempre è possibile scegliere la seconda soluzione per la difficoltà di offrire alla stessa macchina la gamma completa delle possibilità cui deve saper rispondere. Sinora l'automazione è avvenuta per gradi; si sono sperimentate varie fasi di controllo automatico e a quella a ciclo chiuso si è pervenuti in un numero relativamente ridotto di casi. Ci sono voluti diversi anni di studio di un singolo processo prima di poterlo padroneggiare in modo completo. Il costo dell'esperimento ne ha, per ovvie ragioni, risentito.
Il problema, in ogni caso, è il seguente:
— disporre di terminali che misurino un certo numero di grandezze in modo corretto e le presentino, opportunamente arrangiate, all'unità di calcolo;
— disporre di un modello matematico soddisfacente del processo da controllare;
— presentare all'operatore, in tempo utile, il quadro della situazione su schermi o carta stampata.
Per la prima parte le difficoltà sono facili da capire: occorre strumentazione opportuna, abbastanza credibile e tale che permetta di trasformare rapidamente le misure raccolte in segnali speciali. Ciò che si misura di solito sono le pressioni, le temperature, le tensioni elettriche, la viscosità, il grado di umidità, la composizione di una miscela ecc. Si osservano, attraverso i sensori, le variabili primarie; al calcolatore, però, possono essere trasmessi altri indici. Un problema tutt'altro che semplice sorge al momento della scelta delle variabili da controllare: quali sono realmente le piú significative per un certo impianto? Se si può ridurre il numero si semplifica il modello e lo si rende meno costoso. Solo la esperienza aiuta a fare una buona scelta; spesso si nota che le variabili si condizionano in modo assai complesso. L'impianto, d'altra parte, si presenta come una macchina in evoluzione: via via che produce, modifica il suo assetto intimo e il modello matematico che lo simula deve potervisi adattare. La fase piú delicata è in ogni caso la definizione del modello matematico. Si è visto che occorre molto tempo per comprendere completamente che cosa avviene quando un numero elevato di fluidi vengono immessi all'interno di un contenitore a reagire. Si è anche osservato che ogni impianto ha un suo particolare modo di comportarsi; non è certo detto che a un altro impianto simile il modello del primo si adatti nel giusto modo.
Se si vogliono ridurre i tempi per l'intervento umano o della macchina i materiali che occorrono sono piú costosi. A volte si punta sulla conduzione ottimale e la strategia di controllo si fa piú difficile; altre volte si desidera ridurre al minimo l'impiego di materiali costosi o analizzare i tempi morti operativi, rilevare lo stato delle attrezzature, controllare la qualità dei prodotti finiti. C'è tutta una gamma di difficoltà che sorgono ogni qualvolta si sceglie l'una o l'altra soluzione. Il costo del controllo di processo ne risente.
In genere, il costo dipende da quattro fattori: la macchina di calcolo, la strumentazione, la messa a punto del programma di calcolo e l'installazione. Il calcolatore è di solito l'elemento piú costoso, ma qualche volta è stata la costruzione del modello matematico a richiedere la maggiore spesa.
È questo un settore dell'informatica di sicuro avvenire. Se è difficile fare il punto sull'attuale stato dell'arte, è sintomatico che ogni azienda di dimensioni consistenti si è cimentata col controllo di processo. Si dice di quanto si è ottenuto, ognuno volendo per sé i vantaggi acquisiti. Probabilmente siamo in una fase di attenta valutazione di quanto si è ricavato in vista di scelte impegnative. L'industria che si è mostrata piú sensibile alla cosa è quella a forte contenuto scientifico: la chimica, la petrolchimica, l'elettronica, l'aeronautica e cosí via. In Italia si avverte una certa fiducia nella nuova tecnica da parte di chi l'ha sperimentata. Le nostre aziende piú importanti vi si interessano manifestamente: Montedison, IRI, FIAT, ENI ne seguono gli sviluppi ed accumulano, per parte loro, esperienze interessanti.
L'industria dei calcolatori non ha mai smesso di occuparsene a fondo. Non sono stati lesinati mezzi per migliorare la tecnica ed offrire delle soluzioni interessanti. Il fatto che un'industria come l'ENI decida di entrare nel gioco pur non essendo una grande dell'elettronica dovrebbe voler dire che il futuro del controllo automatico è ormai a portata di mano o forse è già cominciato.

GIOCHI MATEMATICI

di *Martin Gardner*

Passeggiate a caso di maggiolini semiubriachi e altri problemi nel quadrato e nel cubo

Il mese scorso si è discusso il percorso a caso costituito da una successione di passi discreti lungo una retta, con o senza barriere assorbenti e si è illustrata la sorprendente equivalenza tra questo problema e taluni giochi d'azzardo tra due persone. Questa volta esaminiamo percorsi a caso sul piano e nello spazio.

Un esempio bidimensionale che è stato molto studiato è il seguente: il cammino si svolge sul reticolo della scacchiera infinita della figura qui sotto, da un vertice a un altro adiacente; la lunghezza di ciascun passo è unitaria, e inoltre, il cammino è « simmetrico », nel senso che ciascuna delle quattro possibili direzioni ha probabilità $1/4$ di essere scelta. Si può rendere finito il cammino circondando il pedone con barriere assorbenti, indicate dai punti colorati; quando il pedone si imbatte in uno di questi punti viene « assorbito » e il cammino finisce. (Le barriere attorno al pedone possono formare un contorno di forma qualsiasi, non necessariamente quadrata.) Come nel caso analogo del cammino finito sulla retta, non è difficile calcolare la probabilità che un percorso iniziato da un certo vertice interno al contorno si arresti a una barriera determinata. Si può anche calcolare il valore atteso (ossia la media su un gran numero di cammini diversi) del numero di passi che costituiscono un percorso. Le formule che si presentano in calcoli di questo genere hanno molte applicazioni scientifiche inattese, per esempio, nel calcolo delle tensioni nelle parti interne di una rete elettrica.

Passeggiata a caso su un reticolo quadrato.

La situazione diviene molto piú complessa se il pedone, anziché essere circondato da barriere, può muoversi liberamente in un reticolo che ricopre l'intero piano. In questo caso si presentano problemi a tutt'oggi non risolti; taluni teoremi già stabiliti sono paradossali e profondi. Considerando, per esempio, un percorso a caso su di un reticolo infinito senza barriere, avviene che, se lo stesso dura per un tempo arbitrariamente lungo, il rapporto tra il numero totale di visite che il pedone fa a un dato vertice e il numero totale di visite a tutti i vertici ha per limite lo zero. D'altro canto, se il cammino dura per un tempo sufficientemente lungo, il pedone toccherà sicuramente qualsiasi vertice, compreso quello di partenza. Come John G. Kemeny ha messo in luce nel suo eccellente articolo divulgativo *Cammini a caso* in *Enrichement Mathematics for High School* (National Council of Teachers of Mathematics, 1963), questo fatto introduce una profonda distinzione tra possibilità logica e possibilità pratica. È *logicamente* possibile che il pedone cammini in eterno senza mai passare per un dato vertice; per il matematico, tuttavia, la probabilità *pratica* che ciò avvenga è zero, sebbene il valore atteso del numero di passi necessario per raggiungere un qualsiasi vertice dato sia infinito. Questa distinzione si presenta spesso allorché entrano in gioco insiemi infiniti. Per esempio, lanciando una moneta infinite volte, è logicamente possibile che testa e croce continuino ad alternarsi regolarmente in eterno; ma la probabilità pratica che ciò avvenga è nulla.

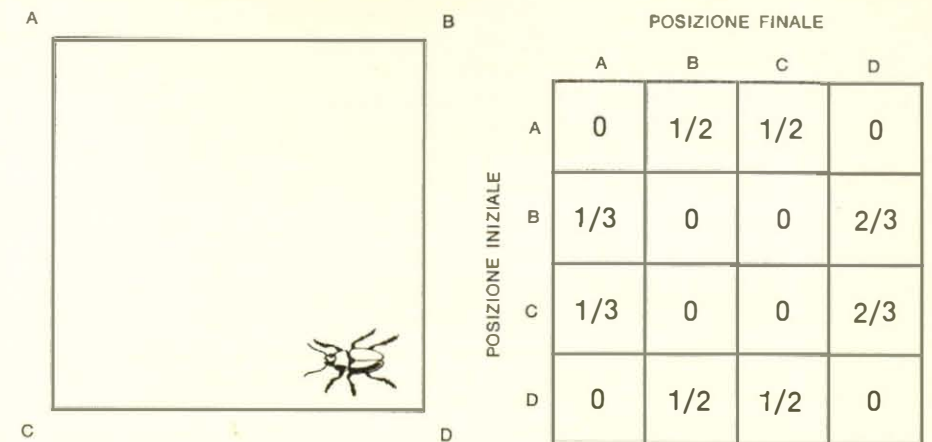
Kemeny esprime tale concetto nel modo seguente: un viandante sta fermo a una delle intersezioni del reticolo infinito mentre un suo amico, partito da un punto diverso, vaga a caso per il reticolo; il girovago giungerà sicuramente a incontrare il primo viandante, purché questi lo attenda per un tempo arbitrariamente lungo. Questa affermazione può essere resa ancora piú stringente aggiungendo che, anche dopo che il primo incontro è già avvenuto, la probabilità che il secondo viandante, continuando a girovagare, finisca col tornar dal primo continua a essere 1. In altri termini, è praticamente certo che il viandante, se ha abbastanza tempo, visiterà infinite volte una qualsiasi intersezione!

Si supponga ora che due pedoni si muovano a caso su di un reticolo quadrato infinito: si incontreranno o no? (Se inizialmente essi distano tra loro un numero dispari di passi e si muovono all'unisono, non verranno mai a incontrarsi in un vertice: potranno invece imbattersi l'uno nell'altro a metà di un segmento.) Anche in questo caso la risposta è che essi si incontreranno infinite volte se la marcia dura sufficientemente a lungo.

Se tre persone vagano a caso per un reticolo infinito muovendosi all'unisono, e se i punti di partenza sono a due a due separati da un numero pari di passi, essi si incontreranno certamente tutti e tre *in qualche vertice*. Tuttavia, la probabilità che l'incontro avvenga in un vertice *assegnato* è minore di 1. Nel caso di 4 o piú persone, anche la probabilità di un incontro in un vertice *non specificato* diviene minore di 1.

Il fatto piú sorprendente si presenta quando si estendono queste considerazioni a un reticolo nello spazio. Se un reticolo spaziale è finito (non necessariamente cubico), vi è la certezza pratica che un percorso a caso verrà a passare per qualsiasi intersezione entro un tempo finito; Kemeny esprime questo fatto osservando che una persona la quale si muova a caso entro un grande edificio dotato di un complicato intreccio di scale e corridoi finirà certamente per raggiungere un'uscita entro un tempo finito. Se invece il reticolo è infinito le cose vanno diversamente: nel 1921 George Polya dimostrò che, anche camminando per tutta l'eternità, la probabilità che un percorso a caso passi per un vertice assegnato qualsiasi è, in questo caso, inferiore a 1. Nel 1940 W.H. McCrea e F.J.W. Whipple provarono che il pedone ha una probabilità di circa 0,35 di ritornare al punto di partenza dopo aver vagato un tempo infinito attraverso un reticolo cubico infinito.

Passando dai reticoli piani al piano vero e proprio, ossia permettendo al marciatore di muoversi per un tratto unitario in una qualsiasi direzione scelta a caso, la situazione si fa piú complicata per certi aspetti e piú semplice per altri. Per esempio, dopo n passi uguali, il valore atteso della distanza (ossia il valore medio della distanza) del pedone dal luogo di partenza è semplicemente la lunghezza di un passo per la radice quadrata di n. Questo fatto è stato provato da Albert Einstein in un articolo sulla statistica molecolare pubblicato nel 1905, lo stesso anno in cui apparve il suo famoso primo articolo sulla relatività.

		POSIZIONE FINALE			
		A	B	C	D
POSIZIONE INIZIALE	A	0	1/2	1/2	0
	B	1/3	0	0	2/3
	C	1/3	0	0	2/3
	D	0	1/2	1/2	0

Una « passeggiata ergodica » (a sinistra) su un quadrato e la matrice delle relative probabilità di transizione (a destra).

Anche i percorsi costituiti da una successione di passi a caso nello spazio obbediscono alla stessa formula della radice quadrata. Come nel caso piano, non è detto che i percorsi siano tutti di uguale lunghezza. Il valore atteso della distanza dall'origine dopo n passi, è uguale alla lunghezza media di un passo moltiplicata per la radice quadrata di n. È in questo caso che i percorsi casuali divengono insostituibili nello studio dei fenomeni di diffusione, per esempio dei moti casuali delle molecole di un liquido o di un gas, della diffusione del calore nei metalli, della propagazione dei rumori, del diffondersi di epidemie e cosí via. Ma vi sono applicazioni in quasi tutti i campi della scienza: il metodo Montecarlo, che serve a simulare coi calcolatori elettronici difficili problemi di probabilità, ha trovato la sua prima applicazione di rilievo nel calcolo dei percorsi a caso dei neutroni entro vari mezzi. In un fenomeno di diffusione di quest'ultimo genere, come anche nel caso del moto browniano, la formula della radice quadrata deve essere modificata per tener conto di molti altri fattori, come la temperatura, la viscosità del mezzo circostante, e cosí via. Per di piú, moti di questo tipo non sono, in genere, discreti, ma continui e vengono perciò detti « processi » di Markov per distinguerli dalle « catene » di Markov. In questi casi, la formula della radice quadrata fornisce solo una prima valutazione approssimata del valore atteso delle distanze. (Si veda l'articolo *Moto browniano e teoria del potenziale* di Reuben Hersh e Richard J. Griego, in « Le Scienze », n. 10, giugno 1969, per una rassegna del lavoro piú recente in questo campo, a cominciare dal primo brillante articolo di Norbert Wiener sul moto browniano apparso nel 1920.)

Lo spostamento di un « viandante a caso » dal punto di partenza, tanto sul piano che nello spazio, non aumenta a ritmo costante, perché, anche se la lunghezza di ciascun passo resta costante, la radice quadrata del numero di passi cresce a una velocità via via minore; quindi, piú lungo è il cammino, piú piccolo diviene l'incremento dello spostamento. Ecco come Gamow, nel libro *Uno, due, tre.... infinito*, spiega questo fatto: un quanto di luce vicino al centro del Sole impiega circa 50 secoli nel suo « percorso dell'ubriaco» verso la superficie; appena uscito ridiventa sobrio all'istante e, se la sua direzione è quella giusta, raggiunge la Terra in circa 8 minuti.

Ecco ora un semplice problema la cui soluzione sarà data il mese prossimo: due pedoni partono da un medesimo punto del piano; uno dei due compie 70 passi a caso di lunghezza unitaria e si ferma; il secondo si ferma dopo aver compiuto a caso 30 passi uguali. Qual è il valore atteso della distanza finale tra i due?

Passiamo ora a un tipo di percorso a caso diverso da tutti quelli considerati fin qui. Ammettiamo che un maggiolino si muova a caso partendo dall'angolo A, lungo i lati del quadrato della figura qui sopra. Invece di attribuire valori uguali alle « probabilità di transizione » da un angolo all'altro, come si è fatto negli esempi precedenti, si assuma che agli angoli B e C la probabilità che il maggiolino si diriga verso D sia il doppio della probabilità che esso ritorni verso A. Nei punti A e D la probabilità che il maggiolino scelga l'uno o l'altro dei due percorsi possibili è $1/2$; mentre in B e C il maggiolino sceglie la direzione verso D con probabilità $2/3$ e quella per A con pro-

babilità $1/3$. Il circuito su cui si svolge il percorso è finito, ma, non essendoci barriere assorbenti, la passeggiata non ha mai termine. Un cammino di questo tipo è normalmente detto cammino ergodico. Vorremmo ora calcolare quante visite il maggiolino compie a ciascun angolo nel corso di una passeggiata molto lunga.

Un modo di effettuare questo calcolo consiste nel costruire la « matrice stocastica » illustrata a destra nella figura a pag. 99. Tale matrice mostra le probabilità di transizione da un angolo a un qualsiasi altro; gli zeri stanno a indicare le transizioni che non possono aver luogo. Poiché da ogni stato di questa catena di Markov ergodica si deve necessariamente passare a qualche altro stato, la somma delle probabilità che compaiono in una qualsiasi riga orizzontale (costituente quello che viene chiamato un vettore di probabilità) deve essere 1.

La probabilità che il maggiolino visiti un dato angolo è data dalla somma delle probabilità che esso vi giunga dall'uno oppure dall'altro angolo adiacente durante la sua marcia senza sosta. Per esempio, la probabilità di trovare il maggiolino in D è data dalla somma della probabilità che esso vi pervenga da B e della probabilità che esso vi pervenga da C. (Si tratta qui delle probabilità a lungo termine e non delle probabilità che il maggiolino giunga in D quando *parte* da B o C.) Sia d la probabilità di trovare il maggiolino in D a un dato istante e siano a, b, c, le analoghe probabilità di trovare il maggiolino in A, B, C. Dalla colonna D della matrice si vede che la probabilità a lungo termine che il maggiolino vada da B a D è b ($2/3$) e quella che vada da C a D è c ($2/3$): di conseguenza, poiché la probabilità di trovare il maggiolino in D è la somma delle due probabilità precedenti, possiamo scrivere l'equazione: $d = b\,(2/3) + c\,(2/3)$ che, semplificata, diviene:

$$d = 2b/3 + 2c/3.$$

Le altre tre colonne ci danno formule analoghe per a, b, c:

$$a = b/3 + c/3$$
$$b = a/2 + d/2$$
$$c = a/2 + d/2$$

Considerando che, se il maggiolino non si trova su di un lato, deve necessariamente essere in un angolo, otteniamo una quinta equazione: $a + b + c + d = 1$.

Uno sguardo alle 4 equazioni di prima ci mostra che $b = c$ e $c = 2a$, il che rende semplice trovare la soluzione di tutte le 5 equazioni simultanee: $a = 1/6$, $b = 1/4$, $c = 1/4$, $d = 1/3$.

Ne risulta che il maggiolino passerà $1/6$ del tempo in A, $1/4$ in B, $1/4$ in C, $1/3$ in D; da ciò si vede che il numero di visite a D sarà il doppio del numero di visite ad A.

Il lettore può sentirsi invogliato ad applicare la stessa tecnica di calcolo al problema analogo sul cubo, presentato da Kemeny nell'articolo menzionato prima. La parte sinistra della figura qui sotto mostra il cubo in questione; in questo caso alle direzioni che portano il maggiolino ad avvicinarsi a H è assegnata una probabilità doppia di quelle delle direzioni che lo portano verso A; a destra del cubo è rappresentata la matrice stocastica delle probabilità di transizione. Il complesso costituito dalle 8 equazioni simultanee ottenute dalle 8 colonne, e dall'uguaglianza: $a + b + c + d + e + f + h = 1$, ammette un'unica soluzione. Il maggiolino, nel corso della sua interminabile passeggiata ergodica, dedicherà i 3/54 delle sue visite all'angolo A i 5/54 a ciascuno degli angoli B, C, D, gli 8/54 a ognuno degli angoli E, F, G e infine, i 12/54 all'angolo H; in complesso, dedicherà quattro volte piú visite a H che ad A.

Se un cammino ergodico del tipo descritto è simmetrico, nel senso che a ogni vertice la scelta del passo successivo avviene con probabilità uguali, la frazione di visite dedicate a due qualsiasi angoli assegnati è proporzionale al numero di modi distinti in cui i due angoli possono essere raggiunti. Per esempio, un gatto che compie una passeggiata ergodica simmetrica lungo gli spigoli della grande piramide di Cheope, visiterà il vertice della piramide quattro volte per ogni tre visite a ognuno degli angoli della base: infatti vi sono quattro percorsi distinti che conducono al vertice, mentre i percorsi che conducono a uno degli angoli della base sono soltanto tre. È facile scrivere la matrice e le equazioni relative a questo problema e mostrare che il gatto compirà un $1/4$ delle sue visite al vertice e $3/16$ di esse a ciascun angolo della base.

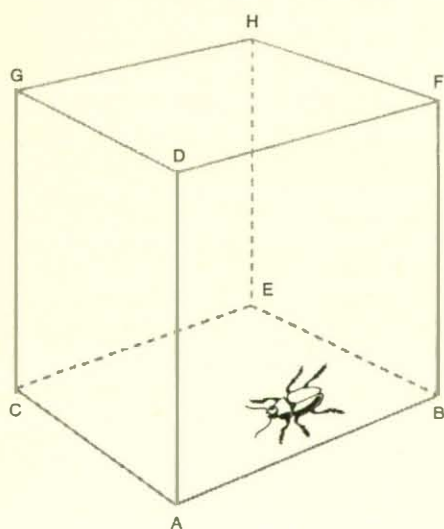
Veniamo ora a un altro semplice problema la cui soluzione sarà presentata il mese prossimo: si consideri ancora il cubo della figura a fronte con la stessa matrice di prima, e si supponga che una mosca incominci un percorso a caso partendo da A; contemporaneamente un ragno parte da H muovendosi anch'esso a caso. Posto che i due insetti si muovano alla stessa velocità, che probabilità hanno di incontrarsi a metà di uno spigolo dopo che ciascuno di loro ha percorso almeno uno spigolo e mezzo di distanza?

In connessione ai cammini ergodici lungo gli spigoli di un cubo o di altri solidi regolari si presentano molte altre questioni interessanti, per esempio, la seguente. Se un maggiolino « ubriaco » parte da uno degli spigoli di un cubo dirigendosi verso lo spigolo opposto, e se a ogni spigolo sceglie una delle tre possibili direzioni con uguale probabilità, la lunghezza della sua passeggiata sarà, in media, di 10 spigoli. Se il maggiolino è solo « semiubriaco », cioè se evita di tornare indietro lungo lo spigolo appena percorso, ma sceglie tra le restanti due direzioni con probabilità uguali, la passeggiata fino al vertice opposto a quello di partenza sarà lunga, in media, 6 spigoli. Tuttavia, in entrambi i casi, la lunghezza di una passeggiata di andata e ritorno da e verso lo spigolo di partenza è, in media, di 8 spigoli.

Ciò non avviene per una semplice coincidenza; infatti Thomas H. O'Beirne di Glasgow (che ha coniato il termine « semiubriaco ») ha provato (ma la dimostrazione non è stata pubblicata) che un cammino a caso di andata e ritorno, svolgentesi lungo un intreccio di segmenti dotato di vertici tutti topologicamente equivalenti, è costituito, in media, da un numero di passi pari al numero dei vertici. Ciò è vero tanto se a ciascun vertice la direzione di provenienza è inclusa nel numero delle direzioni equiprobabili del passo successivo, quanto se ne viene esclusa; in tal modo, il viaggio di andata e ritorno di un maggiolino ubriaco o semiubriaco che si muove da un angolo all'altro di un quadrato, sarà lungo, in media, quattro passi. Gli spigoli dei solidi platonici e archimedei formano circuiti spaziali regolari dello stesso genere. Su di un tetraedro il maggiolino ubriaco o semiubriaco dovrà percorrere in media quattro spigoli prima di aver compiuto il suo viaggio di andata e ritorno da e verso lo spigolo di partenza; se si muove su di un decaedro dovrà percorrere 20 spigoli, e cosí via.

Non è necessario limitarsi a percorsi costituiti da passi che connettono coppie di vertici adiacenti di un intreccio: consideriamo, per esempio, il percorso casuale simmetrico di una torre degli scacchi, assumendo che, ogni volta, la torre scelga la propria mossa tra tutte quelle possibili con probabilità uguali. Poiché una torre può raggiungere ogni data casella da 14 altre, a ogni mossa viene assegnata una probabilità di 1/14; cosicché la torre passerà lo stesso periodo totale di tempo in ogni casella.

Per gli altri pezzi della scacchiera la situazione è diversa, giacché le probabilità di transizione variano da caso a caso. Un re, per esempio, può raggiungere le caselle agli angoli della scacchiera solo partendo da due altre caselle, mentre può raggiungere ciascuna delle 16 caselle centrali partendo da otto altre. Poiché il rapporto tra le due probabilità è ora 2/8, ossia 1/4, ne segue che nel corso della sua marcia perpetua a caso sulla scacchiera, il re visiterà ognuna delle caselle d'angolo un numero di volte pari a un quarto delle visite compiute a ognuna delle 16 caselle centrali.

Il problema del mese scorso sui giochi d'azzardo voleva essere uno scherzo: se il giocatore A parte con una certa somma e se, a ogni estrazione di carta da un mazzo che contiene lo stesso numero di carte rosse e nere, il suo avversario B può scommettere metà della somma attualmente posseduta da A, è chiaro che il gioco è identico a quello spiegato prima nello stesso articolo, in cui A scommette sempre metà del *proprio* capitale. B, il quale ora stabilisce la puntata, verrà a vincere precisamente quanto A perdeva nell'altro gioco; di conseguenza, la formula data il mese scorso per il primo gioco si applica anche al secondo. In base ai dati del problema, il giocatore perdente inizia il gioco con 100 lire e le carte vengono estratte da un mazzo di 52. Il vincitore è certo di guadagnare esattamente $100-[100(3/4)^{26}]$ lire, lasciando cosí il perdente con meno di un centesimo.

	POSIZIONE FINALE							
POSIZIONE INIZIALE	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0	1/3	1/3	1/3	0	0	0	0
B	1/5	0	0	0	2/5	2/5	0	0
C	1/5	0	0	0	2/5	0	2/5	0
D	1/5	0	0	0	0	2/5	2/5	0
E	0	1/4	1/4	0	0	0	0	1/2
F	0	1/4	0	1/4	0	0	0	1/2
G	0	0	1/4	1/4	0	0	0	1/2
H	0	0	0	0	1/3	1/3	1/3	0

Un percorso ergodico a caso su un cubo (a sinistra) e la matrice delle corrispondenti probabilità di transizione (a destra).